

NN31545.0670

NOTA 670

maart 1972

Instituut voor Cultuurtechniek en Waterhuishouding
Wageningen

BIBLIOTHEEK DE HAAFF

Droevendaalsesteeg 3a
Postbus 241
6700 AE Wageningen

**MATHEMATISCH ONDERZOEK NAAR DE WATERTOEDELING
AAN LANDBOUW EN WATERWINNING
EN DE WATERSCHAPSTAAK DAARBIJ**

ir. W. C. Visser

**BIBLIOTHEEK
STARINGGEBOUW**

Nota's van het Instituut zijn in principe interne communicatiemiddelen, dus geen officiële publikaties.

Hun inhoud varieert sterk en kan zowel betrekking hebben op een eenvoudige weergave van cijferreeksen, als op een concluderende discussie van onderzoeksresultaten. In de meeste gevallen zullen de conclusies echter van voorlopige aard zijn omdat het onderzoek nog niet is afgesloten.

Bepaalde nota's komen niet voor verspreiding buiten het Instituut in aanmerking



0000 0672 8105

INHOUD

	blz.
HET DOEL VAN HET ONDERZOEK	1
DE BETEKENIS VAN SAMENVATTEND EN DEELONDERZOEK	2
WAT IS EEN MODEL	4
HET MODEL VOOR MEER LAGEN	6
DE WATERBALANS UITGEDRUKT IN DE PROCESFUNCTIES	10
DE FORMULE VOOR DE POMPPUT	11
DE WATERBERGING ALS FUNCTIE VAN GRONDWATER- DIEPTE EN CAPILLAIRE OPSTIJGING	13
HET GEBRUIK VAN HET REKENMODEL	19
DE BETEKENIS VAN COMPENSERENDE FOUTEN	20
DE TECHNIEK VAN HET VEREFFENEN	23
DE KEUZE VAN DE TOETSINGSVARIABELE	25
AANPASSINGSMOGELIJKHEDEN VAN HET MODEL	25
DE BETROUWBAARHEID VAN DE SCHATTING VAN DE PARAMETERWAARDEN	26
HET TE GEBRUIKEN MODEL	31
HET VEREFFENINGSSYSTEEM	33
VOORBEELDEN VAN BEREKENING	38
HET BEREKENEN VAN DE AFVOERFUNCTIE VOOR EEN BEEK	40
DE BEEKSTAND ALS EXTRA GEGEVEN	42
DE BEEKAFVOER ALS TOETSINGSGROOTHEID	43
HET WATERBEHEERSASPECT	46
HET VERDAMPINGSASPECT	47
HET WATERWINNINGSASPECT	51

	blz.
HET OP DE MEEST GEDIFFERENTIEERDE PRAKTIJK- VRAGEN GERICHTE REKENSHEMA	56
SLOTBESCHOUWING	60
DE OP DE PRAKTIJK GERICHTE DOELSTELLING	61
DE BETEKENIS ALS PROTOTYPE VAN ONDERZOEK	62

Het doel van het onderzoek

In de beschouwing in Nota 671 over de wijze waarop in de toekomst drink- en gebruikswater geproduceerd zou kunnen worden met minimale bezwaren voor andere belangen, werd er de nadruk op gelegd dat er drie belangen in het spel zijn waarvoor een kwantificering reeds goed mogelijk is.

Naast landbouw en grondwaterwinning heeft het waterschapswezen sinds eeuwen met de waterbeheersing van doen gehad. De waterschapstaak was vroeger vooral op de afvoer gericht. Maar sinds een aantal decennia is het duidelijk geworden dat een waterconservatietaak eveneens van belang is. Men heeft het in de hand, de afvoer bepaalde grenzen niet te laten overschrijden. Door middel van het aanhouden van winter- en zomerpeilen, hetzij door een daarop ingestelde bemaling, dan wel door het stellen of zwichten van stuwen kan men zowel waterovermaat als watertekort beïnvloeden. De waterconservatietaak op basis van hydrologie en landbouwwetenschap is nieuw. Er is op grond van onderzoek nog weinig steun aan de juiste uitvoering van deze taak gegeven, zodat de hoogte van zomer- en winterpeil alsmede de datum van overgang nog grotendeels op praktijkervaring berusten. Met het op zich nemen van de waterconservatietaak is de ontwikkeling nog niet ten einde. Reeds ziet men hoe vooral grote waterschappen de afvalwaterzuivering als taak toebedeeld krijgen, een taak die ook wel aan gemeenten en zuiveringsschappen toevalt. Verder laat het zich aanzien dat de zorg voor de waterhuishouding te enigertijd de bredere vorm van milieubeheer zal aannemen en met voordeel aan de waterschapstaak zal kunnen worden toegevoegd.

Bij deze zorg voor de waterhuishouding zal het gedeelte, dat op de waterconservatie betrekking heeft, van belang zijn voor de landbouw en het milieubeheer, maar vooral ook voor de grondwaterwinning. Dit is speciaal het geval omdat verwacht wordt, dat de waterbehoefte snel zal toenemen, terwijl andere winningsmethoden dan die welke van grond-

water gebruik maken nogal wat kostbaarder zijn dan de grondwaterwinning.

De beschikbare tijd zal te kort zijn om het systeem van waterbeheersing zich geheel op grond van praktijkervaring te laten ontwikkelen. Dit is ook niet nodig omdat heel wat gespecialiseerde deskundige kennis beschikbaar is. Bundeling van deze gespecialiseerde kennis zal wenselijk zijn om de tijd van opdoen van inzicht in de waterhuishouding in zijn meest complexe vorm te bekorten.

De betekenis van samenvattend en deelonderzoek

Het onderzoek dat in de toekomstige waterbeheersingstaak een inzicht moet geven zal gecompliceerd zijn, maar veel onderdelen zijn reeds diepgaand bestudeerd. Het bestaat uit vier onderdelen, die alle vier een volledig en omvangrijk onderzoek representeren. Deze onderwerpen vormen in het waterhuishoudingsonderzoek echter deelproblemen.

Aan het onderzoek naar de grondwaterstroming - basis voor de waterwinningsvraagstukken - is reeds lang degelijk werk verricht. Het vormt een omvangrijk onderwerp van studie.

Ook aan de invloed van water op de geldelijke gewasopbrengst - de agrohydrologie tezamen met de economie - is veel aandacht gegeven. Ook dit vormt voor velen een volledige onderzoekstaak.

Al even omvangrijk is het onderzoek van de bodemhydrologie als belangrijk onderdeel van de bodemfysica. In de waterbeheersingstaak is dit echter, hoe belangrijk ook, slechts een deelprobleem.

Tenslotte zullen deze drie gebieden van studie samengevat moeten worden tot een op de praktijk gericht geheel van waterbeheersing ten behoeve van landbouw en grondwaterwinning beide, wat als gevolg van de gecompliceerdheid slechts op mathematische wijze te hanteren is. Ook dit aspect van samenvatten vormt een omvangrijke taak, welke zich echter moet baseren op een mathematische techniek die jong is, en pas uitvoeringsmogelijkheden verkreeg op de dag dat in ons land de zeer grote en zeer snelle rekenautomaten beschikbaar kwamen.

Wanneer men deze vier volledige taken tot een enkel geïntegreerd geheel samenvoegt, dan zal een taak ontstaan die voor gespecialiseerde onderzoekers reeds bijzonder omvangrijk zal zijn. Deze taak echter zal alleen goed verricht kunnen worden als hij in handen wordt gesteld van de waterschapsdeskundige. Deze deskundige kan een volledig overzicht

omtrent de doelmatigheid van het project hebben. Hij zal de resultaten van de studie moeten kunnen beoordelen en de voor- en nadelen tegen elkander afwegen. Men moet een zo goed mogelijk inzicht in het nagestreefde praktische doel combineren met kennis van de wetenschappelijke technieken. Maar als het niet lukt deze combinatie van kennis te verwerklijken, dan zal de kennis van het praktische doel primair te stellen zijn. De analyse van een probleem kan men aan een team van deskundigen opdragen. Voor de synthese is het echter noodzakelijk dat de draden in een enkel hoofd samenkomen en daar tot een conclusie en een algemene lijn leiden. De mathematische synthese van het waterbeheersingsprobleem zal op het gebruikmaken van de berekende oplossing van weloordachte computerprogramma's ingesteld moeten zijn.

De ingenieursbureaus en technische staven van de waterschappen die de taak van het ontwerpen van het waterbeheersplan zal toevallen, zal men de last van een deel van de onnodige moeilijkheden van het hanteren van modellen en oplossingsmethoden moeten ontnemen door ze in staat te stellen op zo veel mogelijk op de praktijkvragen gerichte, tevoren opgestelde rekenmodellen terug te vallen. Er moeten dan nauwkeurig omschreven aanwijzingen zijn omtrent de aard van de te verzamelen of op te vragen gegevens alsmede omtrent de betekenis en wijze van gebruik van de berekende uitkomsten.

Het doel van het Sallandonderzoek is daarom niet alleen of in de eerste plaats het oplossen van de voor de waterwinning belangrijke grootte van de opgetreden landbouwschade. Van groter belang is het opstellen van een voorschrift tot uitvoeren van het waterbeheersingsonderzoek en het construeren van rekenmodellen die onder zo breed mogelijke reeks van omstandigheden toepasbaar is. De resultaten daarvan moeten goed genoeg zijn om redelijk stand te kunnen houden tegenover de kritiek van landbouwers, de waterschapsstaven en het waterwinningspersoneel.

Zou men er naar streven om voor vrijwel alle omstandigheden een oplossing te kunnen geven, die ook ten aanzien van details aan kritiek van specialisten het hoofd zou kunnen bieden, dan zouden onderzoeksvoorschrift en rekenmodel vermoedelijk te ingewikkeld worden. Dit zou voor praktisch gebruik onaantrekkelijk zijn.

Een te geringe aantrekkelijkheid voor praktische toepassing kan naast overmaat aan bewerkelijkheid echter ook voortspruiten uit een tekort aan detail. Zo zijn welbeschouwd de bezwaren tegen het grondlegend onderzoek in het algemeen, dat er te weinig inzicht in details omtrent neveneffecten wordt verkregen, iets wat vanzelf spreekt bij een type van onderzoek dat op analyse en niet op synthese gericht is.

Tussen de twee grenzen van te grote bewerkelijkheid enerzijds en een te beperkt resultaat ten aanzien van details anderzijds, dient de onderzoeker bij het ontwerpen van een rekenmodel een middenweg te kiezen. Daartoe zijn een programma dat met voldoende nevenaspecten rekening houdt, een snelle rekenmachine met voldoende geheugencapaciteit en numeriek niet te gecompliceerde functies een eerste vereiste.

Wat is een model

Het gebruiken van rekenautomaten bij het bewerken van rekenmodellen is nog voldoende nieuw om allereerst de vraag te stellen, wat een model wel is en waarom dit zo bruikbaar is om geïntegreerde vraagstukken op te lossen. Geïntegreerde vraagstukken zijn vraagstukken waarin vele aspecten van het studie-object door verschillende grootheden worden beïnvloed waarbij van de oplossing een zo volledig mogelijk beeld wordt geëist van alle aspecten, waaraan men in de praktijk de beïnvloeding zal opmerken. De geïntegreerde vraagstelling bestaat uit het door berekening vaststellen van de eigenschappen van de keten van processen die tengevolge van natuurlijke toestandsveranderingen of van kunstmatige ingrepen in beweging komen.

Welke invloed heeft bijvoorbeeld grondwateronttrekking op de aeratie of op de verdamping, op de afvoer of op de gewasgroei. Dit zijn alle vragen die samenhangen met de grondwaterstand. Men kan echter ook de nadruk leggen op de beekafvoer en zich afvragen hoe het beekpeil of de beekafvoer zal variëren, wat de frequentie zal zijn van te verwachten overstromingen of wat de invloed zal zijn op de concentratie van afvalwater als gevolg van de variërende beekafvoer. Afhankelijk van de vraag zal men voor de berekening van andere gegevens uitgaan, maar het is ook mogelijk, de oplossingen uit hetzelfde uitgangsmateriaal op te lossen. Het is daartoe van belang, dat het model zo volledig mogelijk alle relevante aspecten van het systeem beschrijft, en men allerlei nevenproblemen op grond van eenzelfde berekening kan oplossen.

fig 1

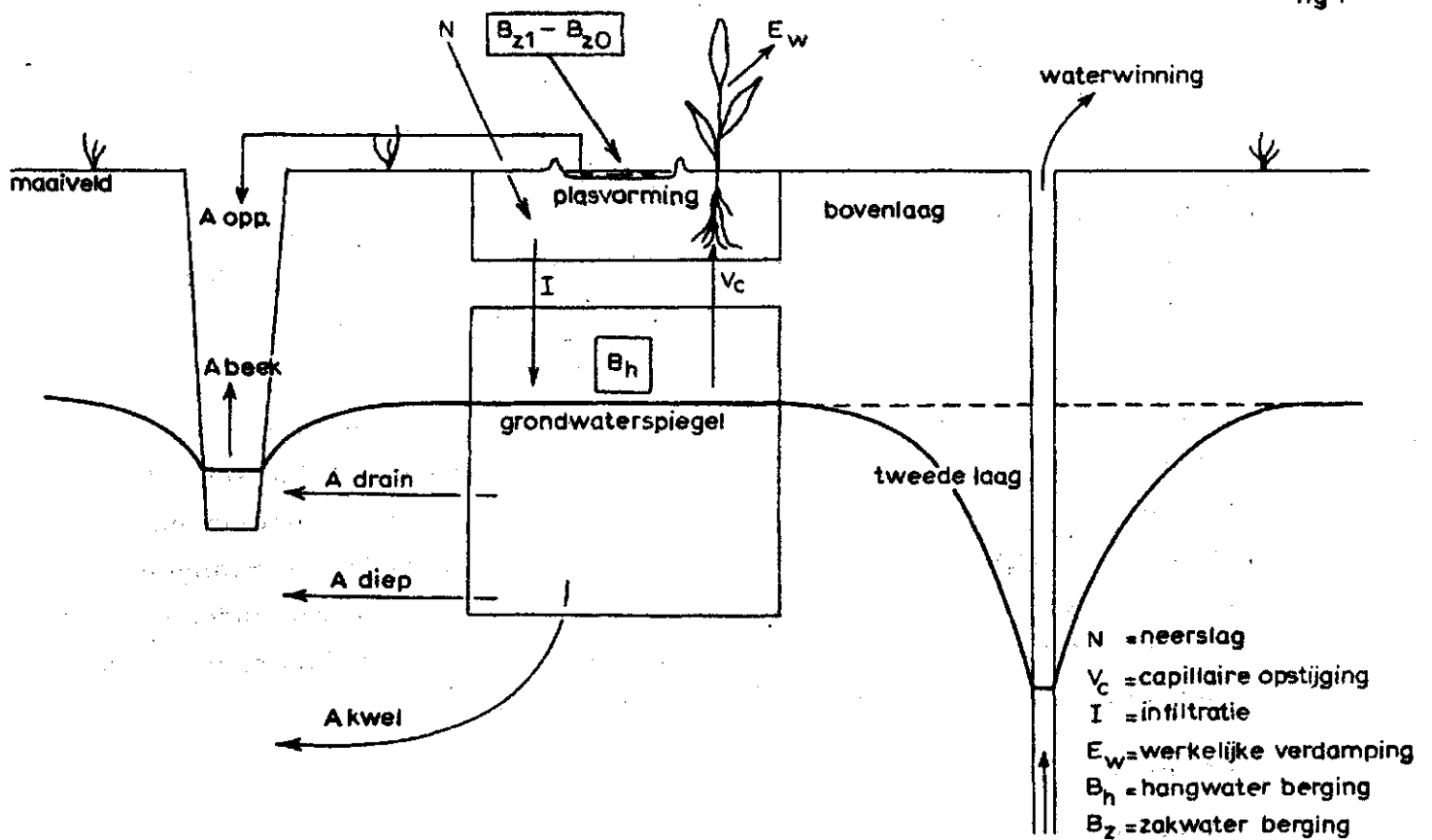


Fig. 1. Schematisch beeld van de waterbalans in een bovenlaag onder invloed van de begroeiing en in een tweede laag onder invloed van afvoer door beken en door waterwinning

In het hier behandelde geval moet het model een zodanige vorm hebben, dat gegevens van belang voor de grondwaterwinning kunnen worden berekend. In het model zal men terwille van de landbouw in elk geval de eigenschappen van de bodemhydrologie terug moeten vinden. Tenslotte zal ook de afvoer door de beek in het model vertegenwoordigd moeten zijn. Aan deze eisen kan worden voldaan door van de waterbalansvergelijking uit te gaan:

$$\text{Neerslag} - \text{aan- of afvoer} - \text{verdamping} - \text{waterwinning} - \text{bergingsverschil} = 0$$

Dit uitgangspunt heeft het voordeel dat het gebaseerd is op de fundamentele fysische wet van het behoud van materie. Het is van belang een model steeds te baseren op een formule die een algemeen aanvaard principe weergeeft zoals dit door de formule voor de diffusie bij het model voor de gewasopbrengst te gebruiken ook is nagestreefd.

De formule voor de waterbalans is een principeformule. Men kan hiervan een meer op de oplossing van de balanstermen gerichte schrijfwijze opstellen door de waterbalans weer te geven voor een meerlagen probleem. Daarnaast kan men de termen van de waterbalans vervangen door formules die deze termen als proces, dus als functie van andere variabelen beschrijven. Hierdoor worden situaties voorspelbaar, die zich in het waarnemingsmateriaal niet hebben voorgedaan.

Het model voor meer lagen

Voor een praktisch bruikbaar model is minimaal vereist, dat het het profiel onderscheidt in een doorwortelde, meestal humusrijke en meer vochthoudende laag en een diepere ondergrond, opgebouwd uit een onverzadigde laag waarin capillaire stromingen optreden. Daaronder volgt dan een verzadigde laag, waarin drainagestromingen plaatsvinden. Fig. 1 geeft hiervan een beeld.

Het profiel wordt daarbij verdeeld in een bovenlaag, die gevoed wordt door neerslag N en capillaire opstijging V_c , terwijl water aan deze laag wordt onttrokken door de werkelijke verdamping E_w en de infiltratie I naar de diepere laag. Om de balans in evenwicht te brengen dient een bergingsterm B_z te worden onderscheiden die het zakwater weergeeft dat geleidelijk als infiltratie naar de diepere laag wegzakt of gedurende het verblijf in de bovenlaag verdampt. Wanneer de hoeveelheid zakwater zo groot wordt dat plassen ontstaan zal oppervlakte-afvoer A_{opp} plaats-

vinden, wanneer althans de inhoud van de plassen een minimum bedrag B_0 te boven gaat.

Wanneer aan- en afvoer niet aan elkander gelijk zijn, dan kan dit ook blijken uit een verdroging en het groter worden van de grondwaterspanning ψ . De grondwaterspanning is een maat voor het vochtgebrek van de grond. Bij verzadiging is de spanning 0, bij de overgang van voldoende vocht naar een tekort aan vocht om de verdamping onbelemmerd te laten voortgaan loopt de spanning op tot 2 à 5 m. Bij $\psi = 16\ 000$ cm wordt het voor de plant onmogelijk vocht aan de grond te onttrekken en komt de groei tot stilstand. Droogt men een grond in de droogstoof, dan komt de vochttoestand, die zich dan instelt, overeen met een ψ -waarde van 10^7 .

Het zakwater B_z is het water dat onder invloed van de zwaartekracht uit het profiel naar de ondergrond wegsijpelt. Het hangwater blijft tegen de zwaartekracht in, zich op de plaats waar het in het profiel aanwezig is handhaven. De afstroming van zakwater kan zo langzaam plaatsvinden dat het van het hierna te bespreken hangwater moeilijk te onderscheiden is.

In de tweede laag wordt de grond gevoed door de infiltratie I uit de bovenlaag of door kwel uit de ondergrond. Water gaat voor de tweede laag verloren door de capillaire opstijging V_c naar de doorwortelde bovenlaag en door diepe zowel als ondiepe afvoerstromen A_{drain} , A_{diep} en A_{kwel} door de ondergrond naar greppels, drain, perceelsloten of diep ingesneden beken. Dit onderscheid naar de diepte van de leiding waarop het water afvloeit moet gemaakt worden omdat bij onderzoek van de afvoerdebieten blijkt dat meer dan één drainagebasis kan optreden, waarvan men alleen de verschillen in diepte via de berekening kan vaststellen. Waar deze drainagebases optreden is een punt van veldonderzoek.

Men kan nu de waterbalans als principeformule voor twee lagen uitschrijven.

$$\text{Bovenlaag} \quad (B_{z1} - B_{z0}) = N - I - E_w + V_c \quad (2)$$

$$\text{te splitsen in} \quad \begin{cases} B_{z1} - B_{z0} = N - I - E_w + 0 & (3) \\ 0 - B_{z0} = N - I - E_w + V_c & (4) \end{cases}$$

$$\text{Diepe laag} \quad (B_{h1} - B_{h0}) = I - V_c - \sum A \quad (5)$$

ΣA stelt voor de som van de boven- en ondergrondse afvoeren, zoals weergegeven in de formules 7 tot en met 10.

In deze formules stelt B_{z0} het tijdelijk als zakwater door de grond vastgehouden water op de voorafgaande dag en B_{z1} op de dag zelf voor. De reeds genoemde zakwaterberging B_0 stelt de hoeveelheid tijdelijk vastgehouden water voor, waarboven oppervlakte-afvoer gaat optreden en dus naast het afzakken door de grond een sneller afvoerproces over de grond gaat optreden. Bij het evenwichtsvochtgehalte is B_z gelijk nul. Onder evenwichtsomstandigheden treedt alleen het capillair gebonden hangwater B_H op. De hangwaterberging hangt af van de grondwaterdiepte, de zakwaterberging is daarvan onafhankelijk. Fig. 5 geeft een beeld van de vochtverdeling over het profiel.

De formules 2 en 5 blijken echter nog niet bruikbaar te zijn, omdat het van elkander splitsen van E_w en V_c tot afzonderlijke hoeveelheden nog niet mogelijk is.

Men kan echter voor de Nederlandse omstandigheden van een gematigd klimaat een vereenvoudigende veronderstelling maken.

Wanneer in de bovenlaag grondwater als zakwater aanwezig is en er dus meer water aanwezig is dan capillair tegen de zwaartekracht in kan worden vastgehouden, dan zal de grondwaterspanning in de bovenlaag vrijwel nul zijn. Er zal geen spanningsverhang zijn dat water capillair kan doen opstijgen. Alleen infiltratie van het boven de evenwichtstoestand uitgaande zakwater is mogelijk. De waarde van V_c zal dus nul zijn indien B_z een positieve waarde heeft.

Daarentegen zal een waarde van $B_z = 0$ de mogelijkheid geven van capillaire opstijging en zal V_c een positieve waarde aannemen. In formules 3 en 4 is dit alternatief aangegeven, dat er van uitgaat dat in de bovenlaag niet gelijktijdig zakwater en dus een vochtovermaat en afwezigheid van zakwater en dus een positieve vochtspanning kunnen bestaan. Men moet onderscheiden tussen $B_{z1} = 0$ waarbij alleen hangwater kan optreden, en de mogelijkheid van capillaire opstijging - dus V_c positief - blijft bestaan met daartegenover $B_{z1} - B_{z0} = 0$, waarbij de zakwatervoorraad constant blijft, capillaire opstijging niet kan optreden doch alleen infiltratie kan voorkomen. De formule voor de waterbalans van de bovenlaag wordt op deze wijze in twee oplosbare gedeelten opgesplitst, waarbij in elke formule een term gelijk nul moet voorkomen.

OVERZICHT 1

infiltratie I	$I = (Bzo + N) e^{-\beta W}$	(6)
perceels afvoer A	$A_{opp} = 10 (Bzo - B_o)$	(7)
	$A_{drain} = B_1 (S_1 - W) + B_2 (S_1 - W)^2$	(8)
	$A_{diep} = B_3 (S_2 - W)$	(9)
	$A_{kwel} = B_4$	(10)
beekafvoer A beek	$A_{beek} = f_1 A_{drain} + f_2 A_{diep} + f_3 A_{kwel} + f_4 A_{opp}$	(11)
beekpeil S	$A_{beek} = K_m (D - S)^{1.67} I^{0.5} \frac{(b / (D - S) + 1)^{1.67}}{(b / (D - S) + 2\sqrt{2})^{0.67}}$	(12)
werkelijke verdamping Ew	1) $Ew = g E_o$	(13)
	2) $Ew = d_1 \psi^{-d_2}$	(14)
grondwaterspanning ψ	$\psi = \frac{-1}{\alpha} \ln \left[1 - (1 - e^{-\alpha W}) \left(1 + \frac{V_c}{k_o} \right) \right]$	(15)
capillaire opstijging V_c	$V_c = Ew + I - N - Bzo$	(3)
zakwaterberging Bz	$Bz_1 = N + Bzo - Ew - I$	(4)
bergend vermogen ΔB_H	$B_{H1} - B_{H0} = I - V_c - \Sigma A$	(16)
bergingsfunctie	$\frac{(1 + C_2)(V_c + \Sigma A - I)}{C_1} = \left(\frac{e^{-\alpha W_1}}{e^{-\alpha W_1 - \frac{V_c}{V_c + k_o}}} \right)^{C_2} W_1^{C_2 + 1} -$ $- \left(\frac{e^{-\alpha W_0}}{e^{-\alpha W_0 - \frac{V_c}{V_c + k_o}}} \right)^{C_2} W_0^{C_2 + 1}$	(17)
putformule	$h_1 - h_2 = \frac{A}{2kD} \left(R^2 \ln \frac{r_2}{r_1} - \frac{r_2^2 - r_1^2}{2} \right) -$ $- \frac{B}{3kD} \left(R^3 \ln \frac{r_2}{r_1} - \frac{r_2^3 - r_1^3}{3} \right)$	(18)
capillariteitscorrectie	$A_{win} = A - Br$	(19)

De waterbalans uitgedrukt in de procesfuncties

Men kan elke principeterm in de waterbalansvergelijkingen 3, 4 en 5 nu vervangen door de formule, die het betreffende proces kwantitatief weergeeft. Op deze wijze gaat de principeformule over in een berekenbare procesbeschrijving. De formules vindt men weergegeven in het overzicht 1.

Voor de berekening moeten de variabelen N en E_0 met de regelmatige tussenpozen van de toegepaste tijdseenheid gegeven zijn. Als tijdseenheid kiest men graag 1 dag omdat met dit tijdsinterval de regencijfers bekend zijn. Voor sommige processen is 1 dag te lang en is alles binnen een dag afgelopen, zoals bijvoorbeeld bij oppervlakteafvoer. Daarnaast dient voor de zakwaterhoeveelheid B_z en de grondwaterstand W een beginwaarde te worden gegeven. De formules hebben de volgende vorm en betekenis (zie overzicht 1).

In formule 6 staat weergegeven, dat het water dat onder invloed van de zwaartekracht zal afzakken zowel als het regenwater in dezelfde positie verkeren en tezamen tot infiltratie komen. Dit kan een zwaartekrachtsstroming zijn of een capillaire diffusie. Voor beide zijn formules beschikbaar. Hier is aangenomen dat de stroming door scheuren en gangen onder invloed van de zwaartekracht plaatsvindt.

De afvoer over (formule 7) of door de grond (formules 8, 9 en 10) geven elk een stroming naar een afzonderlijke drainagebasis weer. Tot oppervlakteafvoer wordt geconcludeerd, indien een berekende grondwaterstand of de grondwaterpotential in de bovenlaag boven het maai-veld uitkomt. Aangenomen wordt, dat eerst bij een zekere diepte van de plas de oppervlakteafvoer begint. De watervoorraad B_0 bij deze diepte van de plas wordt berekend en zou bij negatieve waarden kunnen worden geïnterpreteerd als afvoer over een ploegzool.

Veelal zijn de gronden echter zo doorlatend dat een plas niet lang blijft bestaan. Dagwaarnemingen voor de neerslag liggen dan te ver uiteen om deze oppervlakteafvoer te kunnen opsporen en kwantificeren. Men zou dan met continu registrerende afvoer-, regen- en verdampingsmeters moeten werken, wat voor waterwinningsproblemen echter van te weinig betekenis zal zijn.

Van belang is, dat de kwel zowel positief als negatief kan uitvallen. Dit wijst uit of de kwelstroom naar het waarnemingspunt toe gericht is

of er vandaan.

Wanneer men de juiste fractie van de verschillende afvoerhoeveelheden samentelt, krijgt men de beekafvoer (zie formule 11). Een kleine fractie, bijvoorbeeld bij A_{kwel} , wijst er op dat veel kwelwater pas voorbij het meetpunt in de beek op het open water terugkeert. De fracties moeten worden vastgesteld door toetsing aan beekafvoerdebieten. Deze beekdebieten moeten als toetsingsgrootheid afzonderlijk bepaald worden, evenals de neerslag en de potentiële verdamping waarop het waterbalansmodel berust.

Wanneer men de beekafvoer kent, is het mogelijk op grond van formule 12 van Manning de waterdiepte in de beek en het beekpeil te berekenen. D geeft de bodemdiepte beneden maaiveld aan en S de beekwaterstand beneden maaiveld. $(D-S)$ stelt dus de waterdiepte in de beek voor. De diepte van de drainagebasis wordt door S weergegeven. Heeft men minder belangstelling voor de grootte van de afvoer en is de waterhuishoudkundige toestand in droge tijden belangrijker, dan kan S wel als constante worden beschouwd. Wenst men de afvoer nauwkeuriger te kennen, dan zullen niet-stationaire oplossingen voor de beekafvoer van belang worden.

De vergelijking voor de werkelijke verdamping, te berekenen volgens de formules 13 of 14, geeft in formule 13 weer dat de verdamping wordt bepaald door het verdampend vermogen E_0 van de atmosfeer, terwijl in geval de graad van uitdroging ψ van grond de verdamping bepaalt, formule 14 gebruikt moet worden.

Hoe men vaststelt door welke eigenschap de verdamping beheerst wordt, volgt uit substitutie van formule 3 in 15. Zo elimineert men V_c en substitueert men daarna formule 13 in formule 15 dan geldt dat het argument van de logaritmie niet negatief en dus de log niet imaginair mag worden. Is dit wel het geval, dan wordt formule 14 in 15 gesubstitueerd en ψ opgelost die dan reëel blijft. Wordt ψ imaginair, dan heeft men de verkeerde formule toegepast.

De formule voor de pompput

In formules 18 en 19 wordt de waterwinning verantwoord. Hierbij is van belang, dat bij diepere grondwaterstand de werkelijke verdamping snel terugloopt. Het niet verdampte water gaat voor het gebied met diepe waterstand in vergelijking met de ondiep ontwaterde rand-

gebieden als voeding fungeren. De afname van de verdamping kan daarbij enkele mm per dag bedragen, terwijl de waterwinning enkele tienden van mm per dag bedraagt. De correctie op de verschillen in verdamping is dus van overwegend belang.

In formule 19 is nu verondersteld, dat de waterwinningsintensiteit A_{win} binnen een ringvormige strook van beperkte breedte lineair verandert. Voor deze lineaire invloed die aan de verdamping toe te schrijven is, kan men, geldig over de kleine ringbreedte, de putformule integreren en verkrijgt men formule 18. Voor elke ring worden andere waarden voor A en B gevonden zodat de benadering van de afpompcurve uit een polygoon van kromlijnige lijnstukken wordt opgebouwd. De afpomptrechter zal tengevolge van de invloed van de verdamping dieper, smaller en spitzer zijn dan men met de gebruikelijke formule uit het fundamentele onderzoek pleegt te berekenen. Uitgezocht kan nog worden of een andere functie dan in formule 19 wordt voorgesteld een betere overeenkomst met de invloed van de verdamping toont. Dit zou betekenen dat men met een minder groot aantal ringen een even goede aanpassing zou kunnen krijgen. Ingewikkelder berekeningen verliezen echter met snelle rekenautomaten een groot deel van hun bezwaren. De urgentie van deze verbeterde oplossing leek tot dusverre niet groot genoeg om dit probleem van de wat andere opzet van de capillariteitscorrectie aan te vatten, gezien het ter beschikking staan van een rekentechniek die wel voldoet. Wel wordt rekentechnisch gezien geen fraaie oplossing toegepast. De berekening van de waterbalans is een numerieke integratie over de tijd. Maar voor de pompputberekening wordt in deze numerieke integratie een tweede gelijksoortige integratie ingebouwd. Deze verantwoordt de mate waarin de verdamping varieert als gevolg van de diepte van afpompen van het grondwater en dus met de afstand tot de put.

Indien het gelukt om met een exacte integratie over smalle grondwaterdiepte-intervallen met voor elk interval afzonderlijk aangepaste constanten een goede aanpassing van berekende aangemeten grondwaterdiepten te krijgen, maakt dit een aantrekkelijker reken- en vereffeningstechniek mogelijk. Een techniek, die een reeks exacte integraties met aangepaste constanten sommeert lijkt wegens rekentijd en overzichtelijkheid te prefereren te zijn boven een techniek die afgeleiden sommeert.

In deze beschouwing is een eenvoudige putformule als voorbeeld

genomen, die alleen rekening houdt met freatisch water. Het zal nodig zijn het model aan de plaatselijke omstandigheden aan te passen door de hier uitgewerkte putformule te vervangen door de formule, die volgens de waterwinningsspecialisten voor elke plek het meest doelmatig is. Aan dergelijke, bijvoorbeeld meer met spanningswater rekening houdende formules wordt aandacht gegeven.

De waterberging als functie van grondwaterdiepte en capillaire opstijging

De waterbalans bevat een bergingsterm die de ongelijkheid van aan- en afvoer compenseert. De hoeveelheden geborgen water in de grond kunnen aanzienlijk zijn en zijn voor landbouw en grondwaterwinning van de grootste betekenis ter overbrugging van eventuele geringe toevoer in droge tijden.

Stelt men de daling van de grondwaterstand van winter naar zomer bij ruwe benadering op 80 cm, dan zal om die daling te doen ontstaan bij afwezigheid van capillaire opstijging ongeveer 800 m^3 per ha water uit het profiel moeten worden onttrokken. Dit zal worden veroorzaakt door drainage-afvoer of verdamping tot een bedrag van 80 mm. Neemt men dan ook nog aan dat door de verdamping het luchtgehalte in de bouwvoor van 10 tot 25 volumeprocenten toeneemt en het vochtgehalte evenveel afneemt, dan wordt van winter naar zomer als gevolg van de toenemende uitdroging van de grond bij benadering nog een verdere 800 m^3 per ha of 80 mm water uit het profiel onttrokken.

De bergingsverschillen tussen winter en zomer bedragen dus een hoeveelheid van de orde van $1600 \text{ m}^3/\text{ha}$ of 160 mm.

De hangwaterberging omvat dus een belangrijke hoeveelheid water, en het is van belang deze grootte op de juiste wijze mathematisch weer te geven in zijn afhankelijkheid van grondwaterdiepte en capillaire opstijging. Niettegenstaande deze grote betekenis vindt men in de literatuur niet veel over het bepalen van de hangwaterberging. Hoewel dus deze berging een van de gewone termen van de waterbalans is, is het daarom niet onjuist er een afzonderlijke paragraaf aan te wijden.

Wanneer de grondwaterstand W verandert, maar V_c constant blijft, blijkt, zoals in fig. 2 weergegeven, dat de vochtcurve in een homogeen profiel evenwijdig aan zichzelf in verticale richting van plaats verandert.

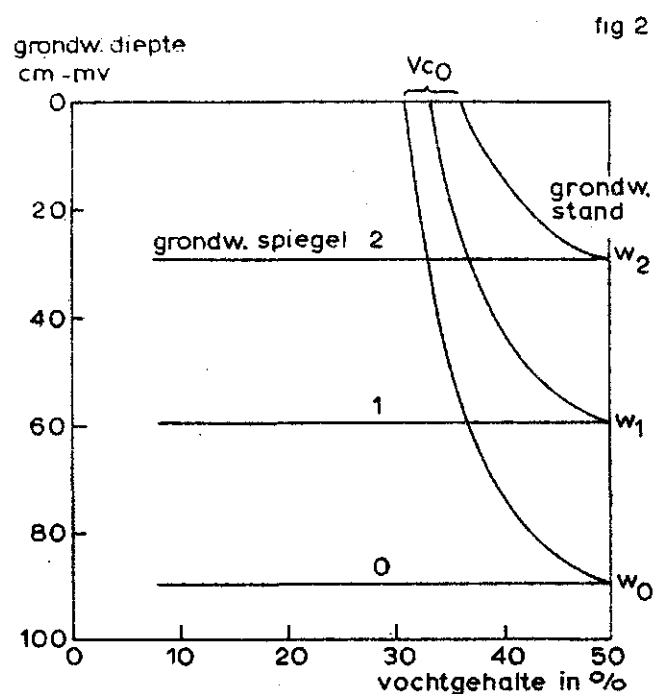


Fig. 2. Schema van de invloed van de grondwaterdiepte op het vochtprofiel van de grond bij gelijke capillaire opstijging. De curven voor het vochtprofiel stellen zich hoger of lager in maar blijven in vorm gelijk

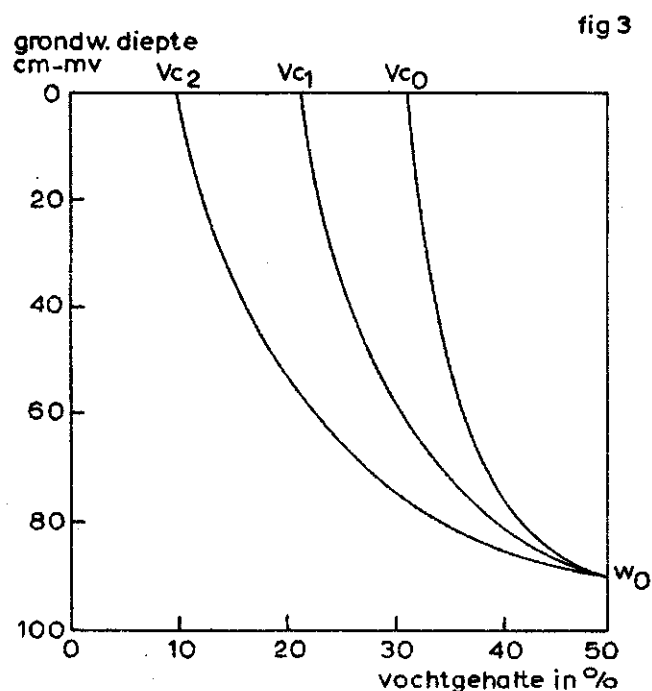


Fig. 3. Schema van de invloed van de capillaire opstijging op het vochtprofiel van de grond bij gelijke grondwaterdiepte. De vochtcurven hellen meer achterover naarmate V_c groter en het vochtgehalte in de bovenlaag kleiner is

Dit vindt op zo'n wijze plaats, dat het punt van de curve met volledige verzadiging samenvalt met de grondwaterspiegel.

Verandert de capillaire opstijging V_c dan blijft het punt van volledige verzadiging met de niet veranderende diepte van de grondwaterspiegel samenvallen, maar de curve - zie fig. 3 - eindigt echter bij een lager vochtgehalte en helt dus meer achterover naarmate V_c groter is.

Voor de curven zijn formules bekend, maar de hoeveelheid water tussen twee curven besloten zou via een integratie berekend moeten worden, welke integratie echter door de specifieke vorm van de formules langs elementaire weg niet mogelijk is. Een vereenvoudiging in de integratieprocedure stelde echter in staat een benadering voor de integraal te vinden, welke weergegeven is in formule 17.

De veronderstelling, waarop de samenhang tussen de doorlatendheid en de vochtspanning berust, is bij deze beschouwing weergegeven door de formule:

$$\log k_c - \log k_o = a(\psi - \psi_o) \quad (20)$$

Deze formule heeft het voordeel van een gemakkelijke mathematische behandeling. Een formule, die over een groter traject van ψ een goede aansluiting geeft, gaat uit van de samenhang:

$$\log k_c - \log k_o = a(\log \psi - \log \psi_o) \quad (21)$$

Deze formule heeft echter het nadeel, dat in de verdere berekeningen de integraties tot functies leiden, die zich vrijwel niet tot vereffen en lenen. Bij elke waarde van a hoort een afzonderlijke formule, die voor vlak bijeen liggende waarden van a zeer belangrijk in vorm en omvang kunnen verschillen.

Naast de juist genoemde problemen doet zich nog een invloed van de korrelgroottedistributie van de gronddeeltjes voor. De minimale capillaire vochtspanning hangt samen met de poriëndiameter volgens

$$\psi_{\min} = \frac{b_1}{r} \quad \text{waarbij } b_1 = \pm 0.3 \quad (22)$$

Verder zal de poriëndiameter bepaald worden door de deeltjesgrootte volgens een lineaire relatie, die maakt dat tussen de deeltjesgrootte δ en de minimale vochtspanning ψ_{\min} een relatie bestaat van de volgende vorm

$$\psi_{\min} = \frac{b_2}{\delta} \quad \text{waarbij } b_2 = \pm 1.5 \quad (23)$$

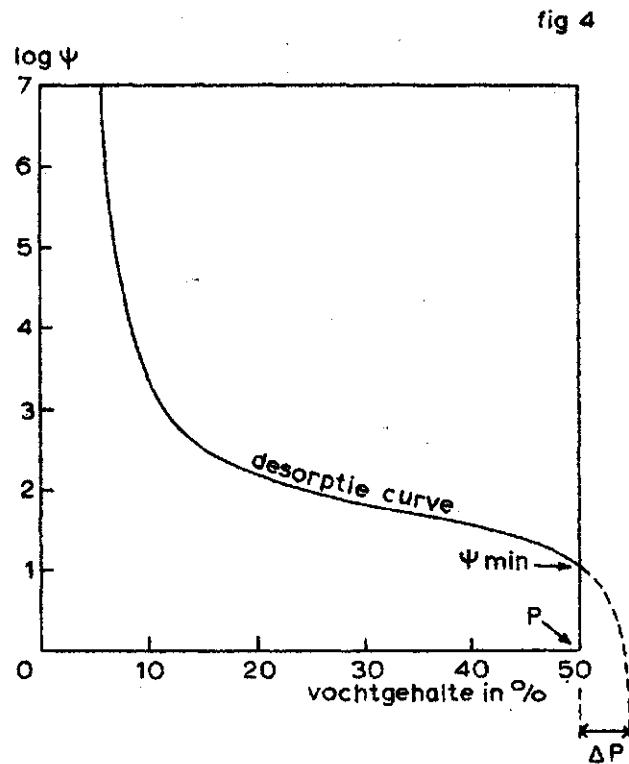


Fig. 4. De desorptiecurve, relatie tussen de vochtspanning en de vochtberging, is mathematisch moeilijk hanteerbaar en wordt tot dusverre door een eenvoudiger curve vervangen. Een het eerst in aanmerking komende verbetering zal zijn, het luchtindringingspunt, overeenkomende met de maximale poriediameter of de minimale vochtspanning ψ_{\min} . in het model op te nemen

Tussen $\psi = 0$ en $\psi = 1.5/\delta$ zullen geen uitgebalanceerde capillaire spanningen kunnen optreden omdat er geen poriën zijn die deze spanningen in stand kunnen houden. Spanningen tussen deze twee grenzen zullen slechts een ogenblik kunnen bestaan en voortdurend verlopen en zullen dus voor de beschrijving van de waterbalans geen betekenis hebben.

Tenslotte wordt in het model verondersteld, dat de desorptiecurve die de relatie tussen de vochtspanning ψ en het vochtgehalte $V\%$ weergeeft, kan worden voorgesteld door

$$V\% = \frac{C_1}{\psi C_2} \quad \text{of} \quad \psi = \left(\frac{C_1}{V\%} \right)^{1/C_2} \quad (24)$$

Op deze veronderstelling berust formule 17.

Nauwkeuriger onderzoek wijst echter uit, dat een formule van de vorm

$$\psi = \frac{C_3(P + \Delta P - V\%)^{C_4}}{V\%^{C_5}} \quad (25)$$

P = poriënvolume
 C_3, C_4, C_5 = constanten

een betere weergave van de desorptiecurve geeft (zie fig. 4) dan de gebruikelijke formule 24. Maar ook deze formule is bij integraties zeer moeilijk toe te passen.

Bij de constructie van het model is tot dusverre verondersteld dat de tekortkomingen in het model aanvaard moesten worden om de berekening niet te ingewikkeld te maken. De tekortkomingen, die formule 21 te verkiezen maken boven formule 20, spelen zich af bij wat hogere ψ -waarden. Die hebben niet zo veel invloed op de uitkomst van het geheel van het model. Het afwezig zijn van een ψ -interval van niet bestaande poriëndiameters volgens formule 23 zal minder belangrijk zijn wanneer, zoals veelal het geval is, het interval niet breed is en er ook daardoor niet veel variatie kan optreden.

Het te eenvoudig weergeven van formule 25 voor de desorptiecurve tenslotte, speelt zich vooral af bij hoge ψ -waarden. Men zou deze tekortkoming op dezelfde wijze mogen beoordelen als die tengevolge van het gebruik van formule 21.

Het lijkt er echter op, dat het bergend vermogen niettegenstaande al deze geruststellende overwegingen een niet onbelangrijke bron van onnauwkeurigheden is en meer om nadere studie vraagt dan termen als de

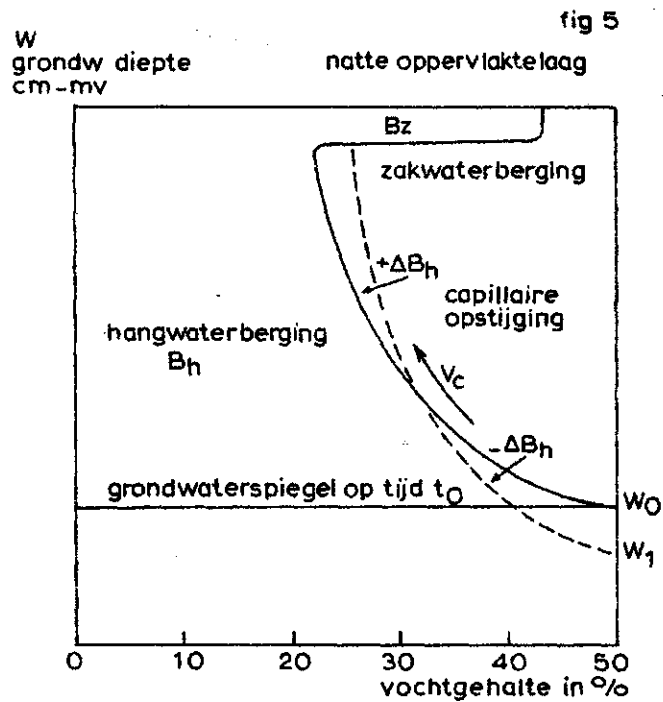


Fig. 5. Wanneer de bovenste laag van een profiel door regen wordt bevochtigd, neemt de vochtspanning in die laag af en blijft het capillair opstijgende water onder de vochtige laag steken. Er treedt een herverdeling van het bodemvocht op, waarbij als gevolg van de regen de grondwaterstand tijdelijk daalt

drainage-afvoer of de verdamping. Dit geldt te meer nu grote en snelle rekenautomaten het noodzakelijke extra rekenwerk gemakkelijker aanvaardbaar maken.

Van belang is verder nog dat bij een beperkte infiltratiesnelheid volgens formule 6 - gekenmerkt door een hoge waarde van β - in de bovenste laag bij regen een vochtige zone ontstaat, waarvan het water tijd nodig heeft om naar het grondwater af te zakken (zie fig. 5).

In deze natte bovenlaag zal de vochtspanning gering zijn en zal het capillaire verhang ontbreken, dat nodig is om de capillaire opstijging tot het maaiveld te laten plaatsvinden. De capillaire stroming zal tot aan de ondergrens van het als zakwater aanwezige regenwater doordringen. Er zal een herverdeling van het bodemvocht optreden.

De grondwaterspiegel zal door de regenval niet stijgen maar van W_0 naar W_1 dalen als gevolg van het opstijgen van water uit de onmiddellijke nabijheid van het grondwater dat de droge zone juist onder de natte laag opvult. Een hoeveelheid ΔB_h aan hangwater zal zich verplaatsen, hoewel in formules 16 en 17 de hoeveelheid hangwater niet verandert (fig. 5).

Op deze wijze geeft de term voor de hangwaterberging in de waterbalansformule een kwantitatieve verklaring voor de variaties in de grondwaterdiepte, die soms wel tegengesteld lopen aan wat men op grond van de regenval zou verwachten.

Het gebruik van het rekenmodel

Modellen krijgen een bijzondere betekenis indien men ze gebruikt om de reeks van processen weer te geven, die door een enkele ingreep in het systeem in beweging worden gebracht. Het model biedt dan de mogelijkheid deze verschillende processen in hun onderlinge afhankelijkheid te beschrijven en op hun kwantitatieve effecten te beoordelen. Terwijl het fundamentele onderzoek een techniek toepast, waarbij alle factoren op één na constant worden gehouden, waardoor het onderzoek een grote nauwkeurigheid aan een geringe compleetheid paart, voldoet het onderzoek met mathematische modellen vooral aan de praktische doelstelling van het toepassende onderzoek. Hierbij wordt juist veelal meer naar de compleetheid dan naar de nauwkeurigheid van een enkel aspect gevraagd. De kans toch is groot, dat ten aanzien van nevenfactoren effecten voorkomen, die met minder nauwkeurigheid bekend zijn en de uitkomsten met betrekking tot de nauwkeuriger bekende fac-

tor vertroebelen. Dit maakt het van weinig belang, een enkele factor zeer nauwkeurig te kennen.

Ook wanneer men bovendien alle factoren met grote nauwkeurigheid op grond van zijn variabelen en parameters zou kunnen beschrijven, is een dergelijke grote nauwkeurigheid veelal van beperkte waarde omdat de meetonnauwkeurigheid van neerslag of verdamping, hoogtetopografie of profieleigenschappen dan ongetwijfeld de grootte van de variatie in de oplossing beheersen.

Ten aanzien van het wiskundige model is de waardering voor het grondleggende onderzoek dat sterk specialistisch getint is om begrijpelijke redenen een andere dan voor het algemeen gerichte toepassen-de onderzoek.

Men ziet in de literatuur dat het onderzoek met mathematische modellen veelal gebruikt wordt om een bepaalde term te leren kennen, bijvoorbeeld de rivierafvoer. Het model wordt een vorm gegeven waarmee een aantal parameters berekend kunnen worden, waarbij voor de vereffening dezelfde eigenschap als de eigenschap die men kennen wil, in het voorbeeld dus de rivierafvoer, als toetsingsgrootheid wordt genomen.

Het is echter ook mogelijk, een willekeurige grootheid waarvoor men geen grote belangstelling heeft, als toetsingsgrootheid te nemen, omdat men daarmee de parameters verkrijgt die in formules die niet tot de vereffende functies behoren gebruikt kunnen worden.

Zo worden de modellen met de grondwaterdiepte als toetsingsgrootheid vereffend, niet omdat men in eerste aanleg de grondwaterdiepte wil kennen, maar omdat men met de gevonden constanten bijvoorbeeld de groei van de gewassen wil kunnen berekenen door de met deze constanten berekende bodemeigenschappen als groeifactoren in de formule voor de opbrengst in te vullen. De vereffening van het model wordt op deze wijze de concurrent van het laboratorium en de veldproef.

De betekenis van compenserende fouten

De waarden van de parameters worden in dit onderzoek op een indirecte wijze door vereffening bepaald. Men zou ze ook met een directe bepaling in het laboratorium kunnen vaststellen. De vraag zal zich nu herhaaldelijk voordoen of deze directe methode niet te verkiezen is boven de indirecte.

Het lijkt voor de hand te liggen te verwachten, dat het meest volledige model, met daarin ingevuld de in het laboratorium verkregen waarden voor de parameters, de beste aanpassing aan te velde bepaalde cijfers zal opleveren. Dit blijkt echter herhaaldelijk niet het geval te zijn. Door vereffening vindt men niet steeds dezelfde waarden als het laboratorium opleverde. Vult men de laboratoriumbepaling van de parameters in het model in, dan krijgt men een grotere afwijking dan met de vereffende waarden.

Met de geanalyseerde of de vereffende parameters rekt men nu de regen en de verdamping om in een grondwaterstand en bepaalt de overeenkomst met de waargenomen grondwaterstanden. De laboratoriumbepalingen zijn vaststaande gegevens, die in het model ingevuld bepaalde berekende waterstanden geven, die ten aanzien van de gemeten waterstanden een zekere afwijking bezitten. De zo verkregen spreiding staat dus vast.

Bij de vereffening daarentegen verandert men de parameterwaarden zo lang tot men de kleinste afwijking heeft verkregen. Door verandering van de parameters is een kleinere afwijking niet verder te verkrijgen, dus ook niet door het overgaan op de laboratoriumwaarden. Deze moeten daarentegen een grotere afwijking leveren dan de vereffening. Alleen wanneer de laboratoriumbepaling aanleiding vormt om het model te veranderen - bijvoorbeeld omdat het vereffeningsmodel te gecompliceerd wordt om in de berekening te gebruiken, maar een eenmalige berekening met de geanalyseerde parameterwaarden en het complexere model wel aanvaardbaar is, kan de laboratoriumbepaling aanleiding zijn tot een betere aanpassing. Maar deze betere aanpassing is dan niet het gevolg van betere parameterwaarden, maar van een gecompliceerder model.

Wanneer men nu aanneemt, dat in het algemeen de in het laboratorium bepaalde parameters een betere benadering van de foutloos bepaalde eigenschap geven dan de vereffende, dan ziet men dat de kleinste afwijking niet samenvalt met de in fysische zin meest nauwkeurige parameterwaarde.

Hieruit volgt dat de met vereffende parameterwaarden berekende grondwaterstanden wel beter overeenkomen met de waargenomen grondwaterstanden, maar de bij die vereffening gevonden parameterwaarden niet beter overeenkomen met de foutloos bepaalde parameterwaarden.

De tegenstrijdigheid die hierin zit kan alleen zijn oorzaak vinden in

het voorkomen van een samenhang tussen fouten in het model en fouten in de vereffende parameterwaarde. De vereffening dwingt de waarnemingen zich zo veel mogelijk aan te passen ook aan de minder juiste aspecten van het model en veroorzaakt deze betere aanpassing ongeacht de minder grote intrinsieke waarde van de berekende toetsingsgrootheid.

Deze minder grote intrinsieke waarde met niettemin een betere aanpassing vindt zijn oorzaak in het bestaan van een correlatie tussen de afwijkingen van het model en de afwijkingen in de vereffende waarden, die als principe van de compenserende fouten zal worden aangeduid. Het belang van de compensatie van de afwijkingen in het model door een juist deze afwijkingen teniet doende afwijking in de door vereffening gevonden waarde van de parameters is van belang indien men de toetsingsgrootheid niet alleen als een aanpassingshulpmiddel gebruikt, maar ook als doel van het onderzoek stelt. De compenserende fouten helpen dan mee om voor de toetsingsgrootheid een goede nauwkeurigheid te bereiken. Veelal blijkt het, dat men met een sterk vereenvoudigd model reeds een zeer goede aanpassing verkrijgt.

Wenst men echter parameters, die geen onderdeel van een toetsingsgrootheid waren, voor berekeningen van andere eigenschappen te gebruiken, dan helpen de compenserende fouten niet, de nauwkeurigheid van deze fouten te vergroten. De juistheid van deze parameters zal afhangen van de fysische juistheid van het model, van de betrouwbaarheid van de neerslag en verdampingsgegevens zowel als die van de toetsingsgrootheid en van de juistheid van de vereffeningstechniek.

Men kan van dit optreden van compenserende fouten een bewust gebruik maken door als toetsingsgrootheid een waarneming te kiezen, die zo nauw mogelijk met de eigenschap verband houdt die men wil kennen. Op deze wijze wordt de kans zo groot mogelijk dat tussen de grootheid die men wil kennen en de toetsingsgrootheid een correlatie zal optreden. Wil men iets over droogteschade weten, dan zal men goed doen voor een droge periode het vochtgehalte of de vochtspanning als toetsing te kiezen.

Overigens is het al of niet optreden van compenserende fouten niet het enige argument dat de haalbare nauwkeurigheid bepaalt. Een gedetailleerd model kan blijken de hydrologische processen met geringere aanpassing weer te geven dan een minder gedetailleerd model. Het gecompliceerde model is dan blijkbaar ten aanzien van een of ander

onderdeel fysisch minder juist dan het eenvoudige model.

Dit zijn problemen, die vaak niet gemakkelijk te overzien zijn. Een voordeel zal later worden besproken, waarbij het beperkte model met de laagste afwijking tevoorschijn komt, zonder dat er rekenen voor een dergelijk gunstig resultaat met het eenvoudige model te geven zijn.

De techniek van het vereffenen

Vereffenen heeft tot doel de parameterwaarden te leren kennen, die aan de procesfuncties de meest juiste kwantitatieve uitkomst geven. Men kan de waarde voor de parameters ook te velde of in het laboratorium bepalen, maar doet dan afstand van de compenserende werking ten aanzien van de fouten van de procesweergave door de op grond van de vereffening van de procesweergave afhankelijke fouten van de parameters.

Heeft men voor de parameterwaarden een schatting verkregen, dan zijn de balanstermen en verdere proceseigenschappen zoals de capillaire vochtspanning of de capillaire opstijging berekenbaar.

Vereffenen vindt plaats op een wat merkwaardige manier. Men begint voor alle parameters een vrij willekeurige waarde aan te nemen evenals voor de beginwaarden van enkele variabelen. Voor elke dag rekent men uit de procesfuncties de toetsingswaarde voor de volgende dag uit, dus bijvoorbeeld de beekafvoer. Dit wordt mogelijk door de berekening van de grondwaterstand voor de volgende dag te bepalen via de berekening van het waterstandsverschil ΔW , waarbij W_2 voor de tweede dag volgt uit W_1 , de waterstand voor de eerste dag volgens $W_1 + \Delta W = W_2$. Uit de W_2 kan men dan de beekafvoer voor de volgende dag uitrekenen.

Het opvallende is nu, dat deze berekeningen geheel met aangenomen waarden worden uitgevoerd, die niets met de praktijk of de verzamelde waarnemingen te maken hebben, met uitzondering van de gemeten regenval N en de potentiële verdamping E_0 , en alleen op wat willekeurige aannamen berusten. Berekent men zo de afvoer voor de opeenvolgende dagen, dan zullen ook afvoeren berekend worden voor de dagen waarop de grondwaterdiepte of de beekafvoer gemeten is. Uit gemeten en berekende afvoer wordt via de verschillen de gemiddelde afwijking berekend. Wanneer men dan voor een gecorrigeerde waarde van een

parameter dit nauwkeurigheidscriterium opnieuw berekent, blijkt uit het groter of kleiner worden ervan of de correctie in de goede richting werd gekozen. Wanneer men in de juiste richting de correctie telkens groter neemt, bereikt men tenslotte een minimumwaarde voor de onnauwkeurigheid. De grootte van het parametersverschil tussen de uitgangswaarde en de plaats van het minimum is echter afhankelijk van de waarde van de andere parameters.

De vereffening volgt nu een weg volgens welke geleidelijk niet voor een enkele parameter, maar voor alle tegelijk de waarde wordt opgespoord, waarbij de mate van overeenstemming tussen de berekende en gemeten toetsingswaarde zo groot mogelijk wordt.

Dit stel van parameters, dat het model zo goed mogelijk doet aanpassen aan de waarnemingen, wordt geacht de hydrologische toestand ook fysisch gezien juist voor te stellen. Hierbij wordt verondersteld dat het model op zichzelf de hydrologische toestand goed weergeeft. Is dit niet het geval, dan kan men met andere modellen voor dezelfde waarnemingen de berekening herhalen en wordt opnieuw een kleinere fout als een aanwijzing gezien voor een betere weergave van de fysische grondslagen van het proces. Deze aanwijzing is echter minder zeker. Ook parameters met geringe fysische waarde kunnen een kleine fout doen berekenen.

Door de vereffening veranderen de parameterwaarden van de weinig praktische waarde van een eerste aanname naar een waarde die het model goed doet kloppen met de waarnemingen. Als het model goed is verkrijgt men dus een goede benadering van de werkelijke getalwaarden voor de parameters door een steeds meer de juiste waarde benaderende correctie aan de aangenomen beginwaarden. Men behoeft dus in het begin geen kennis van de werkelijke getalwaarden te hebben, al kan een indruk omtrent deze waarde het rekenwerk verminderen en vereenvoudigen.

Van belang is ook, dat men voor de toetsingswaarde niet over dag-waarnemingen behoeft te beschikken. Voor de grondwaterstand zijn 14-daagse waarnemingen goed bruikbaar, voor beekafvoeren zijn dag-waarnemingen of waarnemingen op andere korte en vaste tijdsintervallen zeker niet nodig. Wel moet men over waarnemingsreeksen beschikken, waarin de door het model weergegeven deeleffecten in voldoende variatie optreden. Alleen ten aanzien van regenval en potentiële verdamping zijn kleine waarnemingsintervallen van belang.

De keuze van de toetsingsvariabele

In Nederland ligt het voor de hand om de op vele plaatsen al vele jaren waargenomen grondwaterstand als toetsingsvariabele te kiezen. Het vlakke karakter van het land maakt dat dit een belangrijk kenmerk voor de waterhuishouding is. In het buitenland gaat de belangstelling veelal naar de afvoer uit. De kleine Nederlandse beken staan echter vaak droog en geven dan geen maat voor vereffening. Daardoor valt het onderzoek van droge tijden, waarin de verdamping en uitdroging van de grond met zijn mogelijkheden van droogteschade bepaald worden, weg.

Wel kan men behalve de grondwaterstand, de regenval of de potentiële verdamping als maatstaf nemen of het vochtgehalte van de grond of de vochtspanning. Niet al deze vereffeningen zullen hetzelfde resultaat geven. Afvoer geeft een gemiddelde waarde voor honderden of duizenden ha. Dit levert parameters die voor toepassing op opbrengsten of droogteschade aan gewassen weinig waarde hebben. De grondwaterstand of het vochtgehalte geven uitkomsten voor oppervlakten ter grootte van een perceel. Deze gegevens zijn voor opbrengstonderzoek wel bruikbaar maar hebben voor afvoervraagstukken weer beperkte betekenis. Ook de waarnemingsintervallen voor regen van een dag zijn voor afvoervraagstukken wat lang, wanneer men over topafvoeren geïnformeerd wil zijn.

Voor Nederland zou op grond van de gebiedsgrootte wel van belang zijn de afvoer van drainbuizen als vereffeningmaatstaf te nemen. Aan de constructie van een goede drainafvoermeter wordt dan ook aandacht gegeven. Voor het ontwerpen van een goede waterconservatiestrategie lijkt de grondwaterdiepte de beste toetsingsgrootte terwijl voor ecologisch onderzoek men vermoedelijk meer aan vochtgehaltebepalingen zal moeten denken.

Aanpassingsmogelijkheden van het model

Het waterbalansmodel biedt de mogelijkheid elk aspect van de waterbalans in de synthese op te nemen en detailmodellen aan het hoofdmodel aan te sluiten, die nevenproblemen kwantificeren met de waterbalans en andere nevenfactoren als uitgangspunt. Zo kan men het model voor de gewasopbrengst doorrekenen in afhankelijkheid van de waterbalans, de beekafvoer en de invloed van pompputten. Het model

weergegeven in de formules 3 tot 19 geeft hiervan een voorbeeld.

Van belang is dat met een dergelijk model een groot deel van de hydrologie, die op de landbouwwaterhuishouding en de waterwinning betrekking heeft, kan worden omvat. Wanneer het onderwerpen zijn met een sterke terugwerking op de waterbalans, zoals de invloed van afvoerformule 12 in het waterbalansmodel, dan moet zo'n invloed in het model worden opgenomen. Is het toe te voegen onderdeel vrij zelfstandig, dan kan men zoals bij het opbrengstmodel, dit als een deelmodel opstellen en alleen de belangrijke eigenschappen van de waterbalans - voor het opbrengstmodel verdamping en luchtgehalte - als verbinding tussen de twee modellen laten optreden. Men kan op deze wijze allerlei aspecten die nog niet waren opgenomen aan het model toevoegen of daarin bouwen. Het model is zo aan allerlei omstandigheden aan te passen.

Ook wat reeds ingebouwd is, kan veranderd worden. Men kan het pak ponskaarten, waarop een balansterm of een nevenmodel is weergegeven, vervangen door een ander pak ponskaarten voor een andere formule. De infiltratie bijvoorbeeld is weergegeven door een formule die voor stroming door scheuren en gangen geldt. Zou men die willen vervangen door een diffusiestroming van het type van formule 15, of wil men elk van deze formules een deel van het infiltrerende water laten vervoeren, dan is dit, door een submodel voor deze opzet gereed te maken en de betreffende ponskaarten in te voegen, met weinig moeite te realiseren.

Het model is in staat, een groot deel van het hier van belang zijnde vakgebied van de hydrologie te omvatten en kwantitatief voor de hydroloog toegankelijk te maken.

De betrouwbaarheid van de schatting van de parameterwaarden

Een bijzonder belangrijk aspect bij de vereffening is het vaststellen en zo mogelijk opvoeren van de betrouwbaarheid van de schatting van de parameterwaarden. Wanneer men de te velde gemeten toetsingsgrootte met een zeer bevredigende betrouwbaarheid weet te berekenen is het nog niet gezegd dat elke geschatte parameterwaarde nu even betrouwbaar vaststaat. De waarnemingen kunnen een brede of een smalle basis voor het vaststellen van een parameter vormen al

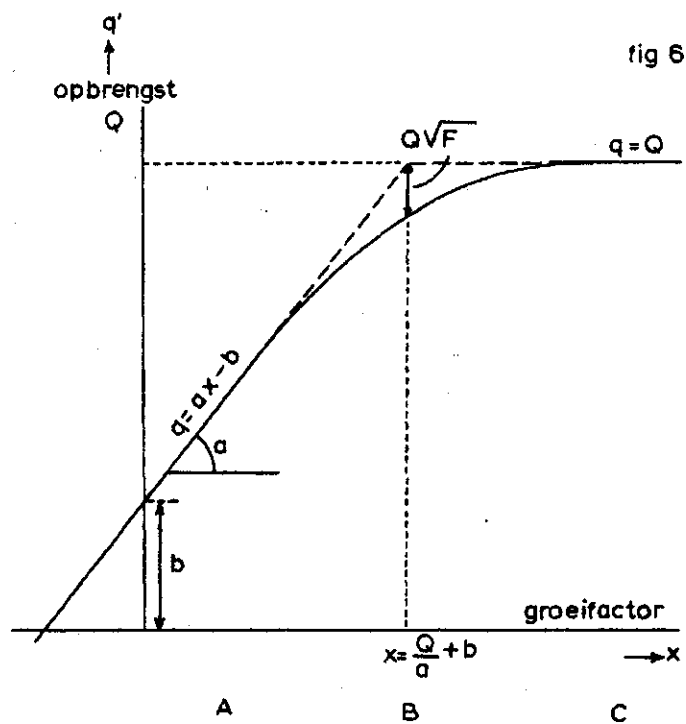


Fig. 6. Veelal worden de opbrengstdepressies in het traject BC het gevolg van de groefactor x beschouwd. Men kan echter aantonen dat de grootte van de opbrengstdepressie in dit traject afhangt van de factoren die men verwaarloosd heeft. Er wordt dientengevolge veelal als effect van de groefactor beschouwd wat aan andere factoren moet worden toegeschreven

naar gelang ze ter bepaling van de parameter een breed gebied omspannen of niet.

Als voorbeeld moge de formule voor de gewasgroei dienen:

$$\left(1 - \frac{q}{ax - b}\right) \left(1 - \frac{q}{Q}\right) = F_1 \quad (25)$$

of het diagram in fig. 6 waardoor deze procesfunctie wordt weergegeven. Berekent men nu x voor het punt waarin de asymptoot

$q = ax - b$ de asymptoot $q = Q$ snijdt, dan ligt dit punt bij $x = \frac{Q + b}{a}$.

Voor dit punt geldt:

$$\left(1 - \frac{q}{Q}\right)^2 = F \quad \text{of} \quad (Q - q)^2 = FQ^2 \quad \text{of wel} \quad F = \left(\frac{Q - q}{Q}\right)^2 \quad (26)$$

Hieruit blijkt dat de afstand tussen de opbrengstcurve en het snijpunt van de beide asymptoten, indien die afstand in delen van Q wordt uitgedrukt, gelijk is aan de wortel uit F . Voor n groeifactoren wordt dit op dezelfde wijze de n^{de} machts wortel uit F .

Wanneer in de berekening een groeifactor y verwaarloosd is, dan wordt die stilzwijgend in de F opgenomen en werkt men eigenlijk met de formule:

$$\left(1 - \frac{q}{ax - b}\right) \left(1 - \frac{q}{Q}\right) = \frac{F_2}{\left(1 - \frac{q}{cy - d}\right)} \quad (27)$$

Is nu y klein en dus $cy - d$ klein, $\frac{q}{cy - d}$ dus groot en $\left(1 - \frac{q}{cy - d}\right)$ klein, dan zal de F_1 in formule 25 groot zijn en er zal een grote afstand tussen de opbrengstcurve en het snijpunt van de asymptoten optreden. De opbrengstlijn in fig. 6 ligt dus vrij diep beneden de asymptoten ter plaatse van het snijpunt. Dit betekent, dat de vorm van de curve afhangt van dat wat men niet wist of niet toepaste. Maar wanneer in fig. 6 ter plaatse van het snijpunt bij B weinig waarnemingen voor q en x beschikbaar zijn zal men de waarde van F evenmin erg nauwkeurig kunnen vaststellen. Zijn er daarentegen niet veel gegevens in het traject BC van x dan vindt men geen betrouwbare waarde voor Q . Wanneer er weinig waarnemingen in het traject AB van x zijn of de waarnemingen bij B dichtbijeen liggen, dan zal deze ligging of het gebrek aan gegevens de schatting van a onzeker maken en die van b doen afwijken. De schattingen van a en b zijn echter gecorreleerd en een kleinere a zal gepaard gaan met een grotere b en

andersom. Op deze wijze ontstaat een afhankelijkheid tussen de schattingen voor de parameters. Het is in gevallen als met a en b mogelijk dat de fouten van a en b afzonderlijk groter zijn dan de fout in het onderlinge verband van ax-b. Het is nu van belang, zowel in de betrouwbaarheid van a en b afzonderlijk als gezamenlijk een inzicht te hebben, omdat veelal de parameters alleen gezamenlijk gebruikt worden.

In een door Stol vervaardigd vereffeningssysteem wordt de betrouwbaarheid van de schatting van de parameterwaarden berekend. Een voorbeeld met een sterk vereenvoudigd model maakt gebruik van de volgende samenhang:

$$W_{i+1} = \frac{C_2+1}{C_1} \left(N_{i+1} + B_1(S - W_i)^2 + gE_{oi} + B_4 \right) + W_i \quad (28)$$

Hierin is B_4 een parameter voor de kwel terwijl met i en i+1 de dag zelf resp. de volgende dag is weergegeven. Het resultaat van de berekening was als in tabel 1 weergegeven.

Tabel 1.

	$\frac{C_2+1}{C_1}$	$\frac{B_1(C_2+1)}{C_1}$	S	$\frac{g(C_2+1)}{C_1}$	$\frac{B_4(C_2+1)}{C_1}$	W_o
Beginwaarde	0.50000	0.00100	100.000	0.50000	0.00000	79.00000
Eindwaarde	1.78000	0.00247	97.400	0.47805	0.94755	87.6542
Standaardafwijking	0.1153	0.00044	4.777	0.81628	0.17064	4.9429
T waarde	15.51	5.57	20.39	0.59 niet significant	5.55	17.73
multiple correlatie 0.939			som restkwadraat 6463		standaardafwijking van het model 7.6148 cm	

In de voorafgaande beschouwing werd de nadruk gelegd op de belangrijkheid van de betrouwbaarheid van het resultaat. Bij deze rekentechnieken ziet men herhaaldelijk dat de berekening hiervan geheel wordt weggelaten, of dat alleen de afwijking van de overeenkomst van de berekening met de waargenomen toetsingsgrootheid wordt bepaald.

Dit laatste is reeds veel waardevoller maar de grootste waarde moet ongetwijfeld gehecht worden aan de betrouwbaarheid van de schatting van de afzonderlijke parameters.

Zo is in het gegeven voorbeeld de g , die de potentiële verdamping E_0 tot de werkelijke verdamping gE_0 reduceert, niet significant.

Nu zijn de waarnemingen voor een winterperiode berekend, waarin de verdamping laag is en andere invloeden als afsterven van gewassen of sneeuw en ijs de verdamping op een andere wijze beïnvloeden dan in de berekening voor E_0 wordt verantwoord. Het model zal niet voldoende volledig zijn om alle effecten weer te geven, terwijl verder het verdampingsbedrag laag is en ook daardoor de onbetrouwbaarheid groter wordt.

Zou men overigens het tijdvak van berekening langer hebben genomen, zodat ook de zomer met grotere verdamping zou zijn opgenomen, dan zou het resultaat niet beter zijn geworden. In de droge periode van 1959 komen te veel situaties voor, waarin de verdamping volgens formule 14 met $d_1 \psi^{d_2}$ berekend had moeten worden. Men mag verwachten dat de vereenvoudiging van de alternatieve formules 13 en 14 tot een enkele formule gE_0 te ingrijpend zou zijn geweest. Deze berekening mag de aandacht er op vestigen dat de neveninvloeden op de verdamping niet gemist kunnen worden.

Verder blijken de drainagekenmerken B_1 en B_4 met een wat beperkte betrouwbaarheid uit de berekening te komen, wat er op wijst dat de hier toegepaste vereenvoudiging, die de formules 7, 8, 9 en 10 vervangt door het eerste deel van formule 8 plus formule 10, vermoedelijk te groot is. De afvoer van water over of door de grond naar verschillende, in plaats van een enkele drainagebasis is een maatgevend criterium voor de hydrologie van Oost Nederland. De betrouwbaarheid van de afzonderlijke parameters kan de variabele aanwijzen die in het model te schematisch is weergegeven en ten aanzien waarvan een andere procesfunctie geprobeerd zou kunnen worden. De toetsingsgrootte W blijkt met een voor de praktijk voldoende betrouwbaarheid te kunnen worden vastgesteld.

Het is van belang, vast te stellen dat de opstelling van het model niet op een bijzondere terreinkennis behoeft te berusten, evenmin als de schatting van de parameters door laboratoriumbepalingen daarvan behoeft uit te gaan. De berekening levert automatisch aanwijzingen

dat het model nog niet goed genoeg is en herziening van belang kan zijn. De parameters worden daarenboven automatisch op een betere benadering gebracht. Ten aanzien van het model zelf gaat de automatische berekening minder ver. Wel worden aanwijzingen verschaft dat de formules van twijfelachtige nauwkeurigheid zijn, maar men moet zichzelf een beeld trachten te vormen van de aard van de tekortkomingen van het model. Of men op grond van dit inzicht tot de fysisch juiste correctie besloot, is minder eenvoudig te zien en lijkt althans nog niet automatiseerbaar.

Het te gebruiken model

Het model, zoals het in de formules 6 tot 18 is weergegeven, heeft bij gebruik enkele nadelen van bewerkelijkheid waaruit hogere rekenkosten voortspuiten. De oorzaak van de bewerkelijkheid ligt voor een deel in het beschrijven van de verdamping met de twee alternatieve formules 13 en 14, geldende resp. wanneer het klimaat via gE_0 of de bodemvochtigheid via $d_1 \psi^{-d_2}$ de omvang van de verdamping bepaalt. Vooral het oplossen van ψ uit de formules 14 en 15 tezamen vergt nogal wat tijd vergeleken met de formules 13 en 15.

Ook de berekening van de hangwaterberging volgens formule 17 vergt veel rekenwerk. Stelt men echter weinig belang in de afvoer dan kan overwogen worden S constant aan te nemen en formules 11 en 12 te laten vervallen. Tenslotte zijn vele berekeningen uitgevoerd waarbij het tweelagen systeem werd vervangen door een enkele laag. Zoals reeds werd beschreven kan men door enkele modellen toe te passen, zich een indruk vormen of de complicaties wel door een betere aanpassing van de berekende toetsingsgrootte aan de gemeten waarde worden goedge maakt.

Een half dozijn modellen, variërende van zeer eenvoudige tot gecompliceerde, werd in een vereffeningsproces getoetst op het verkrijgen van een kleine afwijking en op het oog betrouwbaar aandoen van de parameterwaarden. Het eenvoudigste model dat daarbij getoetst werd was opgebouwd uit de eenvoudigste verdampings- en afvoerterm, maar ook ingewikkelder balansbeschrijvingen werden beproefd. De modellen waren de volgende.

Tabel 2.

Het 6 parameter model:

$$N = B(S-W)^2 + gE_o + \frac{C_1}{C_2+1} \left(W_1^{C_2+1} - W_0^{C_2+1} \right) + A_{kwel} \quad (29)$$

Het 9 parameter model:

$$N = B \left(S^{C_2+1} - W^{C_2+1} \right)^b + \left\{ \begin{array}{l} gE_o \\ \text{of} \\ d_1 W^{-d_2} \end{array} + \frac{C_1}{C_2+1} \left(W_1^{C_2+1} - W_0^{C_2+1} \right) + A_{kwel} \right. \quad (30)$$

Het 11 parameter model:

$$N = B_3(S_3-W) + B_4(S_3-W)^2 + \left\{ \begin{array}{l} gE_o \\ \text{of} \\ d_1 \psi^{d_2} \end{array} + C_1 \psi^{C_2} (W_2 - W_1) + A_{kwel} \right. \quad (31)$$

Het 15 parameter model:

$$N = B_1(S_1-W) + B_2(S_2-W) + B_3(S_3-W) + B_4(S_3-W)^2 + \left\{ \begin{array}{l} gE_o \\ \text{of} \\ d_1 \psi^{-d_2} \end{array} + C_1 \psi^{C_2} (W_2 - W_1) + A_{kwel} \right. \quad (32)$$

Wanneer men het 15 parameter model als uitgangspunt neemt, dan ontstaat het 11 parameter model door van de 8 constanten voor de afvoer er 4 voor de stroming naar de drainagebases B_1 en B_2 buiten beschouwing te laten.

Met het 9 parameter model wordt de afvoer berekend op grond van de afvoerbare hoeveelheid water in plaats van de drukhoogte, omdat een dergelijke formulering soms wat nauwkeuriger lijkt te zijn. Verder is de tijdrovende berekening van ψ weggelaten en vervangen door die van W tot een te berekenen exponent.

In het 6 parameter model wordt in de drainageafvoer-berekening dan nog eens de berekening voor de afvoerbare hoeveelheid vocht door die via de waterstand vervangen, wat weinig ingrijpend is omdat C_2+1 weinig van 1 verschilt. Verder wordt voor de verdamping alleen die op grond

van het klimaat aangehouden en wordt de verdamping die door de droogtegraad van de grond wordt beheerst buiten beschouwing gelaten.

Deze vier modellen zijn voor 10 buizen uitgerekend en voor het aanpassingscriterium wordt met het kwadraat van de multiple correlatiecoëfficiënt R^2 een cijfer gegeven zodat de specifieke invloed van de waarnemingspunten door het middelen van een aantal waarnemingspunten wat wordt afgezwakt. De mate van aanpassing wordt gegeven als de afname van de som restkwadraat ten opzichte van de variatie van de waterstanden rondom het driejaars gemiddelde in delen van de laatstgenoemde variatie en weergegeven als R^2 .

Tabel 3.

	R^2
6 parameters	0.773
9 "	0.855
11 "	0.870
15 "	0.873

Uit dit overzicht volgt, dat het 6 parameter model te eenvoudig is. Meer parameters verhoogt de nauwkeurigheid in steeds verder afnemende mate, hetgeen er op wijst dat de verbetering op de duur slechts schijnbaar is.

Het vereffeningssysteem

In de hydrologische literatuur valt de nadruk op twee vereffeningsystemen. Het eerste, eenvoudigste is de Simplex berekening volgens Nelder, welk systeem in Rothamsted werd uitgewerkt. Het andere is dat van Rosenbrock, dat in de chemische industrie ontstond. Een aantal verdere systemen zijn nog door anderen uitgewerkt. Het lijkt echter mogelijk enkele grondslagen voor de rekentechniek te onderscheiden die van belang zijn voor de vraag of men in deze jonge techniek nog veel verdere principes kan onderscheiden zodat er mogelijk in de naaste toekomst nog belangrijke verbeteringen en versnellingen te verwachten vallen.

Men kan zich afvragen, wat de belangrijke gedachte is waarop elk systeem is gebaseerd. Bij het Simplex systeem lijkt dit te zijn dat de oplossing, die successievelijk benaderd wordt, steeds gebaseerd wordt op benaderingen voor de parameters die de oplossing insluiten (fig. 7a).

fig 7

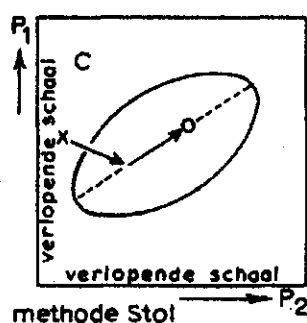
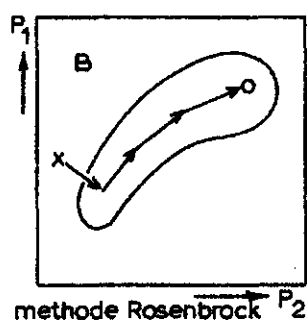
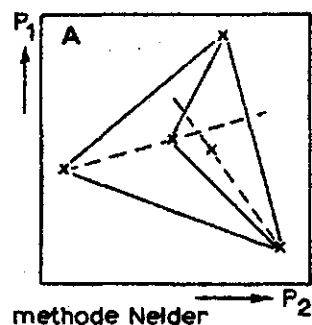


Fig. 7. De drie in onderzoek genomen vereffeningstechnieken vormen een ontwikkelingsreeks. De methode Nelder streeft naar het insluiten van de oplossing, de methode Rosenbrock naar het aftasten van de grote as van de betrouwbaarheidsellips, terwijl de methode Stoll naast vele andere verfijningen door het toepassen van verlopende schalen de grote as recht maakt en de vereffening daardoor zeer versnelt

In het begin neemt men de intervallen zeer groot zodat de kans klein is dat de oplossing daar nog buiten ligt. De werkwijze maakt zo min mogelijk gebruik van extrapolaties.

Door het interval tussen de parameterwaarden, die de oplossing insluiten, steeds kleiner te maken, kan men de oplossing met steeds toenemende nauwkeurigheid vaststellen. De Simplex methode heeft het nadeel dat de convergentie wat traag is.

Rosenbrock legt in zijn vereffeningssysteem de nadruk op het zoeken van de grote as van de min of meer elliptisch gevormde lijnen van gelijke afwijkingen rondom het punt van oplossing (fig. 7b). Veelal zijn de assen van deze ellipsachtige figuren niet recht, maar deze afwijkingen van de rechte worden gecompenseerd door de hoofdas met polygoonen te benaderen.

Rosenbrock's techniek is nu, in een willekeurige richting de afwijking te bepalen. Waar deze richting de hoofdas snijdt zal men de kleinste afwijking in de berekeningen volgens die richting vinden. Doet men dit op twee plaatsen dan geeft de lijn tussen de punten met minimale afwijking de plaats en richting van de grote as weer. Door de afwijkingen langs deze grote as al extrapolerende te bepalen kan men steeds dichterbij de absoluut kleinste afwijking benaderen, waarvoor de parameters de gezochte oplossing representeren. De bewerkelijkheid volgens deze techniek vindt zijn oorzaak in het telkens moeten overstappen op een andere zijde van de polygoon die de kromlijnige hoofdas volgt, wat in een n -dimensionale ruimte met grote n tot een tijdrovende procedure kan leiden.

Een techniek, die door Stol ontwikkeld wordt, heeft tenslotte, gezien binnen deze redenering, als belangrijkste punt dat op grond van een analyse van de eigenschappen van de procesfunctie in de vereffeningsprocedure alsmede door toepassing van fijnere wiskundige en statistische technieken het convergentieproces kwantitatief gevolgd wordt en de gehele procedure hieraan aangepast en er door bijgestuurd kan worden (fig. 7c).

Bij deze wijze van rekenen zijn nog enkele verdere wiskundige verfijningen toegepast als het berekenen van een nauwkeuriger criterium voor de mate waarin men het minimum van de afwijkingen benaderd heeft. In de onmiddellijke nabijheid van de oplossing biedt het criterium van de kleinste kwadraatsom geen nauwkeurig middel omdat het minimum ligt in het traject waar deze kwadraatsom nog maar weinig ver-

andert. Er is alle aanleiding om van deze door Stol nog verder te perfectioneren techniek veel te verwachten, omdat behalve de betrouwbaarheid in de voorspelling van de toetsingsvariabele deze rekenwijze ook de betrouwbaarheid in de schatting van de waarde van de parameter geeft, zoals in tabel 1 werd weergegeven. Zo wordt het mogelijk om de juistheid van het gebruikte model te onderzoeken en vast te stellen, welke term het meest urgent verbetering en aanpassing behoeft.

Wat verder voor de hand ligt aan een onderzoek te onderwerpen is de snelheid waarmee de berekening convergeert. Dit wil zeggen dat wordt nagegaan hoeveel malen men het model moet doorrekenen om tot een bepaalde mate van benaderen van de oplossing te komen. Aangezien men enkele honderden malen met steeds andere parameterwaarden het model moet doorrekenen om zo, al itererende, de definitieve oplossing te bereiken, is het de moeite waard om te zien naar de rekentechniek die het kleinste aantal berekeningen nodig maakt. Drie rekentechnieken werden naast elkaar op de snelheid van convergeren getoetst. Een duidelijk en uniform criterium om de mate van convergentie te kwantificeren, anders dan het aantal berekeningen om tot een ongeveer gelijk grote afwijking te komen, is hier niet toegepast.

Tabel 4.

11 parameter model		
	Behaalde nauwkeurigheid R^2	Aantal iteraties
Simplex methode	0.851	600
Parameter na parameter methode	0.870	552
Visuele beoordeling	0.859	63

Met de 'parameter na parameter' methode wordt telkens evenwijdig aan de assen voor elke afzonderlijke parameter het minimum berekend. Men doet dit zo vaak, dat de wijzigingen in de parameters aan de nauwkeurigheidseis voldoen. Bij de hier toegepaste berekening werd overigens aanleiding gevonden de berekening maar tot een zekere grens van nauwkeurigheid uit te voeren en niet tot het minimum bereikt was voort te zetten. Hiervan werd een beter aanpassingsvermogen verwacht, wel

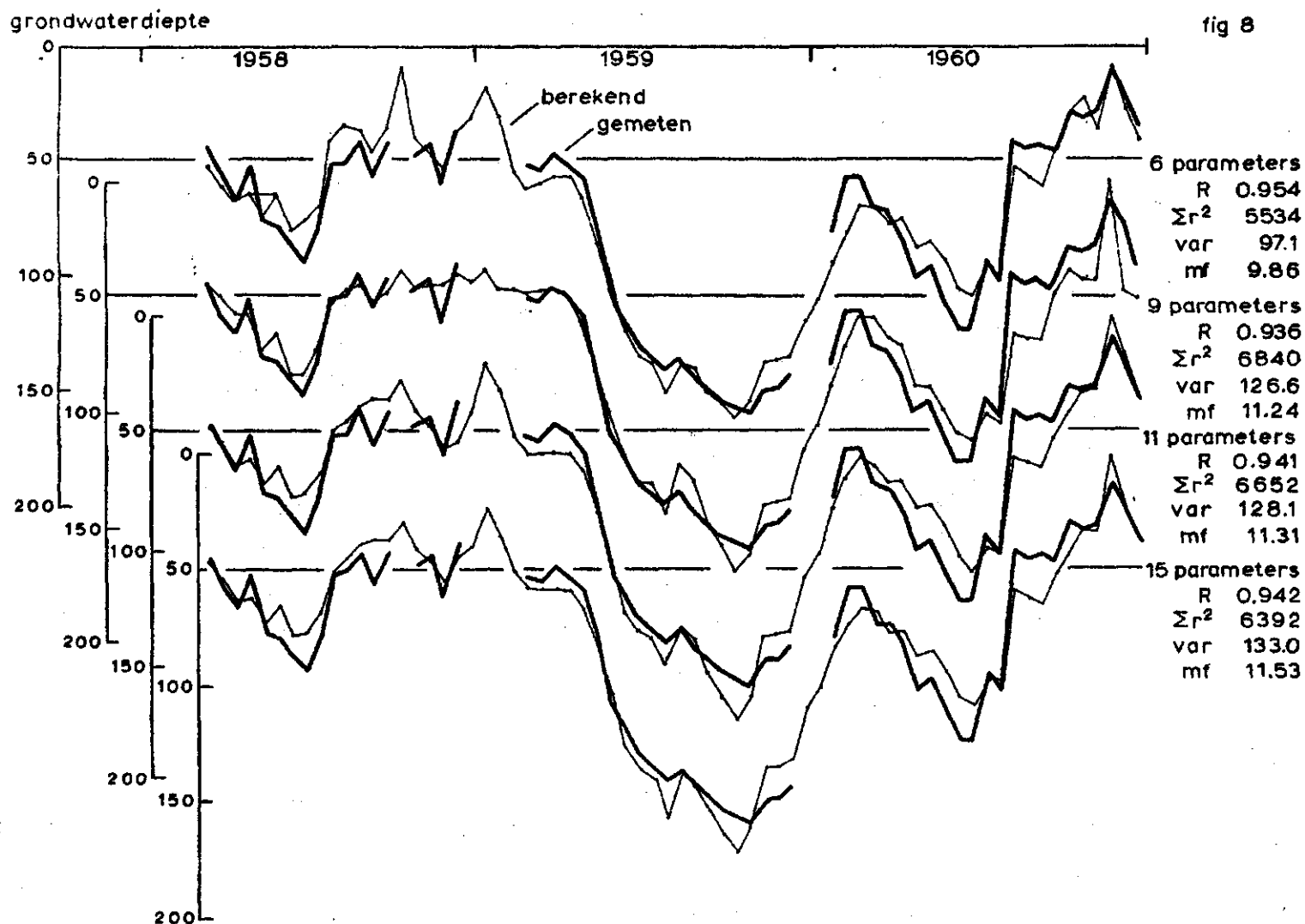


Fig. 8. Vergelijking van de berekende en de gemeten waterstanden voor modellen met verschillende aantallen parameters toont aan dat de overeenkomst goed is en dat op het oog niet veel verschillen in aanpassing vast te stellen zijn. De berekende middelbare fout laat zien dat in dit geval het eenvoudigste model de beste aanpassing geeft. De gecompliceerdste modellen winnen het, indien de Σr^2 als criterium geldt maar verliezen hun voorrang als de middelbare fout als maatstaf wordt genomen

zal daardoor het aantal iteraties wat hoger zijn geworden. Voor de Simplex methode is deze grens voor de vereffening op 600 iteraties gesteld.

Opvallend is dat bij visuele beoordeling van de correcties men met zo weinig berekeningen toe kan. Maar aan teken- en beoordelingsduur vergt dit van de onderzoeker te veel tijd. Wel wil het zeggen, dat wanneer men in de computer een even fijn beoordelingsvermogen zou weten in te bouwen als de onderzoeker van nature bezit, men de bewerking sterk zou kunnen bekorten. De methoden uit de literatuur zijn nog lang niet zo ver als wel mogelijk moet zijn.

Voorbeelden van berekening

Een onderzoek werd ingesteld naar de betrouwbaarheid van weergave van de toetsingsgrootte, in dit geval de grondwaterdiepte. Speciaal werd het van belang geacht te weten of er in de afwijking van de berekende curve ten opzichte van de gemeten waarnemingen nog aanwijzing was van systematische verschillen.

Ook de vergelijking met de visuele bepaling van de correcties van de parameters werd in de beschouwing opgenomen omdat de visuele beoordeling zeer gevoelig is voor systematische afwijkingen, terwijl de kleinste kwadraten berekening op dit punt geen enkel verschil maakt met de toevallige afwijkingen.

De berekening en beoordeling werd volgens de parameter na parameter methode uitgevoerd voor 6, 9, 11 en 15 parametermodellen. Vergelijkt men de gemeten en berekende curven in fig. 8 met elkaar, dan is visueel geen duidelijk verschil in aanpassing waarneembaar. De berekening levert een scherper criterium en toont aan, dat het 6 parametermodel de waterbalans opvallend goed weergeeft, terwijl toch de fysische betekenis van zo sterk vereenvoudigde formules niet groot kan zijn. Een systematische gang in de afwijkingen valt bij geen van de modellen op.

Dat door de vereenvoudiging de deelprocessen bij het 6 parametermodel ongetwijfeld slecht zijn weergegeven en niettemin de aanpassing het beste is, vormt een van de vele moeilijkheden bij het vereffenen, die nog onvoldoende te begrijpen zijn. De kleine fout is in elk geval geen definitieve aanwijzing, dat het 6 parametermodel het beste is. Een maatstaf om mee aan te geven in welke mate het model de fysica

van de deelprocessen voldoende weergeeft is echter niet bekend, zodat voor een definitieve waardering van de doelmatigheid van de modellen alleen een algemeen oordeel over alle deelfacetten ten dienste staat.

Een ander voorbeeld van berekening wordt gevormd door de uitkomsten voor de parameterwaarden. De vereffening betekent dat de neerslag zo over de balanst termen wordt verdeeld, dat volgens de procesfuncties de overeenstemming tussen berekende en gemeten waarnemingen zo goed mogelijk wordt. De regenhoeveelheid wordt bij wijze van spreken over de balanst termen uitgesmeerd. Zijn de procesfuncties niet juist, dan kan het water dat tot de ene balans-term behoort op de rekening van de andere balans-term terecht komen. De parameters zouden voor de verschillende parameteraantallen gelijk moeten uitvallen maar doen dit bij verschil in weergave van de procesfunctie meestal niet. Voor buis 13 in Salland werden de volgende waarden verkregen.

Tabel 5.

Parameter - aantal	6	9	11	15
soort				
B ₁				0.00140
B ₂				0.01430
B ₃			0.042	0.00025
B ₄	0.00167	0.0088	0.00093	0.00236
b		0.39		
S ₁				255.5
S ₂				91.0
S ₃	99.5	70.0	84.5	80.0
A _{kwel}	-2.0	-0.19	0.000	-0.0113
C ₁	0.19	0.134	0.923	0.800
C ₂	1.383	0.79	0.100	0.118
d ₁		0.0025	48.5	80
d ₂		0.99	0.49	0.32
g	1.20	0.650	0.618	0.580
α			0.0053	0.0074
k ₀			3.00	4.200
Σ r ²	8531	8108	7059	6526

Het blijkt dat in de uitkomsten volgens de verschillende modellen nogal wat variatie zit die niet eenvoudig te verklaren valt. Wel ziet men dat S_3 kleiner wordt naarmate de afvoer naar diepere afvoerbases aan het model wordt toegevoegd. Verder blijkt dat bij een nauwkeuriger definitie van de drainageafvoer, de verdamping vermindert. Een deel van de verdamping komt blijkbaar op de rekening van de afvoer terecht.

Veel van de variatie in de $\sum r^2$ is aan de modellen toe te schrijven. De berekening van de berging via W of ψ geeft grote verschillen in C_1 en C_2 . Deze verschillen zijn verklaarbaar ook zonder dat men overdracht van een deel van een balanstern op een andere behoeft te veronderstellen.

In het voorbeeld in tabel 5 is een berekening weergegeven, waarvoor de spreiding met toenemend parameteraantal regelmatig afneemt en de nadering tot een asymptoot had kunnen optreden. Veelal zijn de kwalitatieve verschillen in de modellen groot en overheersen het kwantitatieve aspect van het aantal parameters.

Verwacht werd dat men bij een groter aantal parameters geleidelijk voor enkele parameters een nadering tot een vaste waarde zou kunnen vaststellen. Dit werd het eerst verwacht voor g , A_{kwel} , C_1 en C_2 . Het is echter duidelijk, dat met 15 parameters men nog niet tot de asymptoot van de aanpassing is genaderd, zoals niet alleen uit de parameterwaarden maar ook uit de som restkwadraatwaarden $\sum r^2$ blijkt. Wanneer men verder bedenkt dat vrijwel alles, wat de bodemfysica aan inzicht in het hier van belang zijnde deel van de bodemhydrologie heeft opgeleverd, in het model ingebouwd is, blijft alleen aanleiding over tot de conclusie dat er nog ruimte is voor verbetering van inzicht in de hydrologische wetten die de waterbalans beheersen.

Het berekenen van de afvoerfunctie voor een beek

Het model voor de beekafvoer dient te worden opgebouwd op de regen, de verdamping, een variabele of constante die de beekafvoer aan de rand van het beschouwde gebied beschrijft, en een aantal parameters. Veelal beperkt men zich tot de omstandigheden in het beekprofiel en is de belangstelling alleen gericht op het kennen van de piekafvoer. Wanneer men zich echter richt op de invloed die via de beek kan worden uitgeoefend bij het beheersen van de watervoorraad in het

fig 9

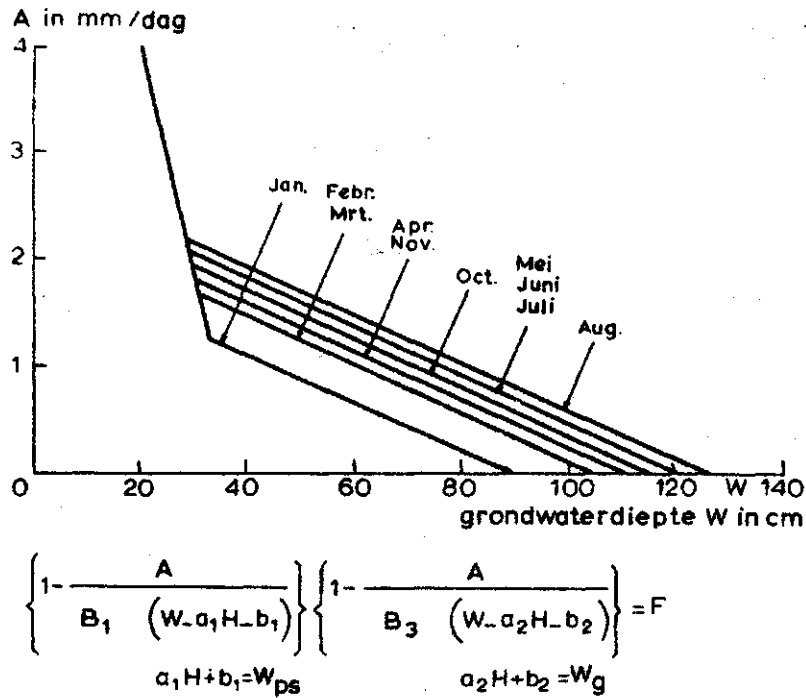


Fig. 9. Het afvoermodel moet rekening houden dat op elk punt meerdere drainagebases hun invloed kunnen doen gelden, wat blijkt uit knikken in de afvoerlijn. Soms is het niveau van de afvoerbasis niet constant, wat blijkt uit verschil in ligging van de afvoercurve voor de opeenvolgende maanden

omliggende land, dan wordt de basis voor het beekafvoeronderzoek verlegd naar de klimatologische omstandigheden tezamen met de drainage vanuit het land naar greppels, perceelssloten en hoofdleidingen.

Men moet in staat zijn met het model de mogelijk optredende ingewikkelde drainagegevallen goed weer te geven. Hiertoe moet steeds van deze moeilijkste gevallen uitgegaan worden, omdat de rekenautomaat zelf vereenvoudigingen kan uitvoeren in de vorm van het berekenen van parameters op een waarde gelijk nul, maar alleen de onderzoeker is in staat het model een ingewikkelder vorm te geven. Het volgende mag dit punt verduidelijken.

In meer theoretische beschouwingen wordt de drainageafvoerfunctie door een eenvoudige eerste- of tweedegraadsformule of een eenvoudige lijn weergegeven. Te velde blijkt men echter steeds gevallen te ontmoeten die ingewikkelder zijn, omdat er meer dan één drainagebasis optreedt.

Het geval dat men meestal aantreft is in fig. 9 weergegeven. Men leest uit deze figuur af dat bij ondiepe grondwaterstanden het water op eenvoudige wijze op een greppel afstroomt, die gezien het knikpunt van de afvoerlijn een diepte heeft van omstreeks 30 cm. Verder blijkt dat de afvoercurve met de maanden varieert. Dit is duidelijk een gevolg van de variatie van de waterstand in de beek waarop de perceelssloten, die het water uit de greppels ontvangen, afstromen. De variatie van het beekpeil moet men beschouwen als het gevolg van de afvoer uit het land. In januari is de beekstand het hoogst en in augustus is het beekpeil blijkaar omstreeks 40 cm lager.

Met de formule voor de afvoer van de greppel op de beek of grotere leiding kan men nu verschillende oplossingen construeren.

De beekstand als extra gegeven

In het algemeen zullen de omstandigheden aan de grenzen van het bestudeerde gebied als randvoorwaarden gegeven worden, omdat men daarbuiten de omstandigheden niet verder wenst te onderzoeken.

Men bepaalt aan de rand van het gebied - dus bijvoorbeeld in de beek - de dagelijkse waterstand W_{Rand} . Van deze waterstand wordt nu aangenomen, dat hij lineair samen zal hangen met de sloot- of beekwaterstand ter plaatse van de drainggestroming, die men geken-

merkt door de S-waarde uit de waterstandsgegevens berekent. De beekstand S_B wordt nu weergegeven met $S_B = a S_{Rand} + b$.

Nu neemt men aan, dat het water deels op de greppel afstroomt en deels op een perceelssloot, waarvan de waterstand door het beekpeil beheerst wordt. Men kan dan de drukhoogte zowel weergeven als de grondwaterstand W min het greppelpeil S_{gp} als door $(W - S_{ps})$, de grondwaterstand W min het peil in de perceelssloot S_{ps} . De formule voor de samenwerkende drainagestromen wordt nu:

$$\left[1 - \frac{A}{(W - a_1 S_{Rand} - b_1)} \right] \left[1 - \frac{A}{(W - a_2 S_{Rand} - b_2)} \right] = F \quad (33)$$

De formule kan ook voor kwadratische afvoertermen worden gebruikt en vormt de gebruikelijke schrijfwijze voor een alternatief proces dat door dezelfde variabele, maar met verschillende parameterwaarden wordt beheerst. De waarde van F bepaalt de breedte van het overgangstraject tussen de beide drainagecurven.

De beekafvoer als toetsingsgrootheid

Een andere mogelijkheid om het beekpeil vast te stellen is, om uit de drainageafvoeren, zoals die uit de waterstandsbuis berekend worden, met behulp van formule 11 de beekafvoer te berekenen door via vereffening de reductiefactoren f_1 tot f_4 te bepalen. Deze reductiefactoren geven aan welk percentage van de verschillende typen drainageafvoer boven het meetpunt voor de beekafvoeren op de beek uitstroomt en dus in de beekafvoer begrepen is.

Verder omvatten de waarden van f een component die verantwoordt in welke mate deze verschillende typen van afvoer in het gebied boven het meetpunt in de beek intreden.

Het is denkbaar dat kwelafvoer op 10% van het areaal van het stroomgebied optreedt en dat 80% van de kwelafvoer beneden het meetpunt voor de beekdebietmeting in het open water terugkeert. Dan zal men voor f_3 een waarde $0.10 \times (1.00 - 0.80) = 0.02$ of 2% vinden. De f verantwoordt dus zowel de veelvuldigheid van voorkomen van een afvoertype als het aandeel, dat het in de beekafvoer op het meetpunt inneemt, terwijl de rest van deze drainageafvoer verder ondergronds stroomt en binnen het stroomgebied niet tot het open wa-

ter toevloei. Met formule 12 wordt daarna de beekafvoer omgerekend in de waterdiepte, die in formule 12 optreedt als de bodemdiepte D beneden maaiveld min het beekpeil S beneden maaiveld. De bodembreedte b en het beekwandtalud vormen de parameters die bekend moeten zijn. Men kan van de plek van debietwaarneming uitgaande, de beekstand S_B ter plaatse van de uitmonding van de drainagestroming berekenen.

Wanneer men door doorrekenen van het model, dat met deze toevoeging een beekafvoermodel is geworden, op een dag voor dag basis de beekafvoer berekent, dan kan voor elke dag waarop de afvoer bepaald is, het verschil tussen de gemeten en de berekende afvoer worden vastgesteld. Door de hieruit berekende fout te minimaliseren kan men op dezelfde wijze als bij de grondwaterpeilen de parameterwaarden berekenen, die de beste overeenkomst tussen meting en berekening doen ontstaan.

Het is van belang dat men zo dag voor dag afvoeren krijgt zonder elke dag over een bepaling van het beekdebiet te hoeven beschikken. Men zou met een enkele debietbepaling per week of twee weken kunnen volstaan.

Wenst men berekeningen van de afvoer voor kortere tijdsintervallen dan een dag in verband met het willen kennen van de afvoertoppen, die veelal van oppervlakteafvoer afhankelijk zijn, dan zal men niet langer met gegevens van het Archief van Grondwaterstanden, de dagafvoeren van Rijkswaterstaat en de klimaatscijfers van De Bilt kunnen werken, maar zal men zelfregistrerende toestellen moeten gebruiken. Tevens zal dan de vereenvoudiging van het model met vrijwel alleen stationaire formules geleidelijk meer moeilijkheden geven en door niet-stationaire formules moeten worden aangevuld. Wel moet bedacht worden dat de voorraden water in het profiel wel op een ongestage wijze worden doorgerekend en dat dit aspect geen aanleiding kan zijn een grotere afwijking te verwachten wegens het optreden van niet-stationaire effecten.

Het vereffenen van numerieke integraties op een tijdsbasis korter dan een dag verliest echter zijn betekenis. Thans worden per iteratieronde 365 berekeningen per jaar tijdsduur uitgevoerd. Bij uurafvoeren zou dit 8760 worden. Dergelijke aantallen worden echter ook voor een snelle rekenautomaat veel.

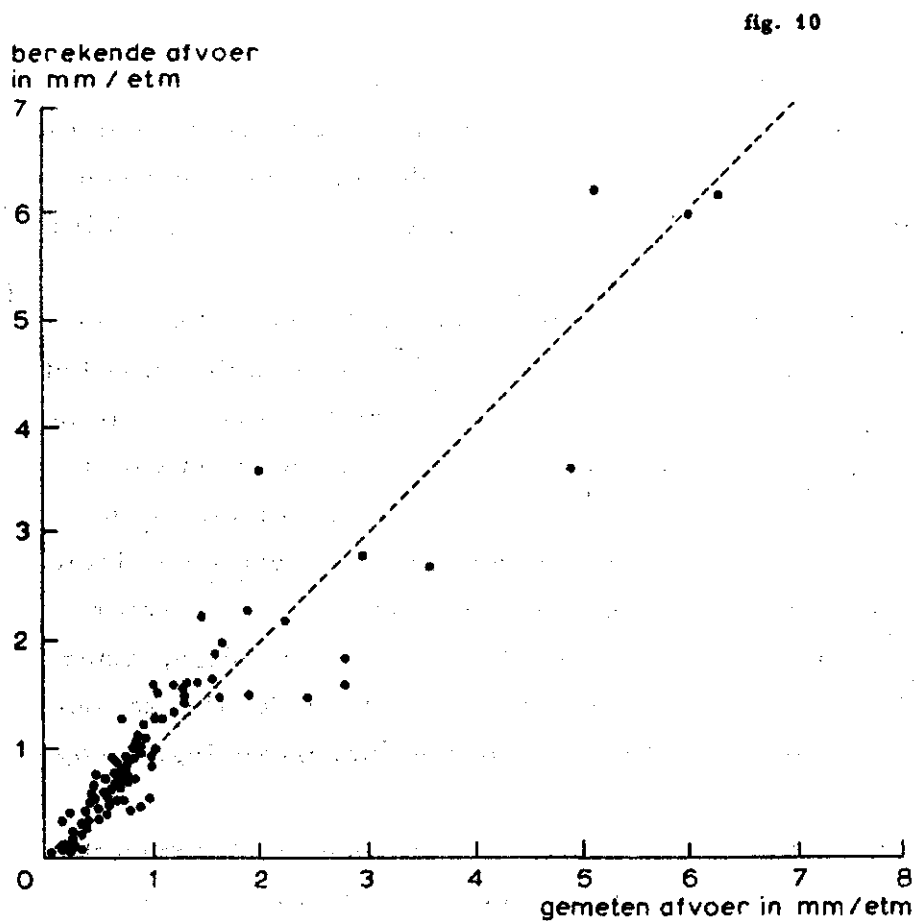


Fig. 10. Men kan elke berekende hydrologische eigenschap, balansterm of rekengrootheid als toetsingswaarde gebruiken en is niet aan de grondwaterdiepte gebonden. Het voorbeeld geeft aan, hoe de afvoer berekend kan worden als gevolg van de hydrologische toestand van het door de beek ontwaterde gebied

In fig. 10 is het resultaat van een afvoerberekening gegeven, waarbij overigens de fout tengevolge van de niet-stationaire effecten is ingedamd door de daardoor optredende afwijkingen op een eenvoudige wijze afhankelijk van de bergingsvariatie te stellen. Met een door vereffening verkregen reductieconstante vermenigvuldigd werd de correctie op het niet-stationaire effect verkregen.

Het waterbeheersaspect

De nauwkeurige kennis van de wijze waarop het afvoerproces tot stand komt en waarop men het kan beïnvloeden door in te grijpen met de weinige parameters, die ter beschikking staan, is duidelijk een waterschapsbelang.

Men kan de slootbreedte en -diepte eenmaal kiezen. Het is een toestandsgrrootheid en geen variabele. Wat men kan variëren is het verhang en het slootpeil, die door de hoogte van het opstuwen te beheersen zijn, alsmede het moment van stellen en zwichten van de stuw. In het polderland kan men dan verder nog water uitmalen en inlaten, op dezelfde wijze als men in beekgebieden water kan laten afstromen of zou kunnen terugpompen. Het model voor de waterbalans en het waterbeheer beide vormt het meest volledige, maar ook meest omvangrijke model waaraan gewerkt wordt. Het zal ook het laatste zijn dat gereed zal komen om routineberekeningen mogelijk te maken.

Van primair belang lijkt te zijn, dat het de band legt tussen de waterbeweging in de sloot en de waterhuishouding van de grond, zowel ten behoeve van de landbouw als ten behoeve van de grondwaterwinning, die op dit punt onscheidbaar zijn.

Door in formule 11 een variatie in de K_{Manning} aan te brengen, kan men een indruk krijgen van de grootte van het effect van maaien of laten groeien van de vegetatie op slootbodem en slootwand. Tevens kan men een uitspraak doen omtrent de beste tijd voor de slootreiniging. In onze grote waterschappen doet men vermoedelijk te veel aan dit maaien. De modelberekening kan in de rentabiliteit van dit maaien ten opzichte van de kans op landbouwschade een inzicht geven. Het laten groeien van het onkruid heeft een waterconserverend effect dat thans in de polderwetenschap praktisch ongebruikt blijft. De praktijk in de kleine polders weet deze waterconservatie-invloed wel ten gunste van landbouw en waterwinning te gebruiken; maar dit wordt

als verwaarlozing van het onderhoud beschouwd.

Het variëren van het verhang I in formule 12 verduidelijkt daarnaast het vraagstuk van het stellen en zwichten van stuwen. De vraag wanneer men het zomerpeil moet instellen, tot wanneer men het moet handhaven en hoe hoog men zomer- en winterpeil moet kiezen, is een vraag die door de waterschappen met veel reserve wordt opgelost en die, hoe voorzichtig ook de peilen worden gekozen, veelal tot opmerkingen van de zijde van de ingelanden leidt. Ten dele vindt dit zijn oorzaak in het gebrek aan concrete grondslagen. Het wordt thans mogelijk deze vragen door modelberekeningen een steviger grondslag te geven.

Tenslotte kan als derde maatregel van slootonderhoud de variatie van de slootbodemdiepte D in formule 12 een indruk geven omtrent de betekenis en het juiste moment van de onderhoudsmaatregel van het slootgraven. Omdat het waterbalansmodel de mogelijkheid opent, de invloed van deze slootonderhoudseffecten op de verdamping te bepalen en de verdamping de verdrogingskansen beheerst, kan men de invloed van deze maatregelen op de landbouwresultaten vaststellen.

Het meest interessant lijkt hierbij op deze basis de aanpassing aan de in de toekomst zeer versterkte waterwinning voor te bereiden. De onttrekking zal de waterconservatie veel noodzakelijker maken. Allerlei onderhoudsmaatregelen ter verzekering van de afvoer zullen verminderd kunnen - en ook moeten - worden. De voorjaarsschouw zal mogelijk kunnen vervallen, de najaarsschouw naar een later moment in het jaar verlegd kunnen worden.

Bij grote toename van de waterwinning, die reeds in de komende decennia te verwachten valt, zal de basis van veel ervaring aan het waterschapsbeleid ontvallen en zal een tijd volgen, waarin oude ervaring niet meer geldt en nieuwe ervaring nog niet bestaat. Er dreigt een periode met grote fouten. Dit te voorkomen en bij de dynamische wijziging van de waterhuishouding aanwijzingen te geven voor een goed waterschapsbeheer zal de taak moeten zijn van het hydrologisch onderzoek in de komende jaren. Het empirische element zal daarbij niet sterk meespelen. Het onderzoek kan deze taak van vaststellen van de beheersgrondslagen thans overnemen.

Het verdampingsaspect

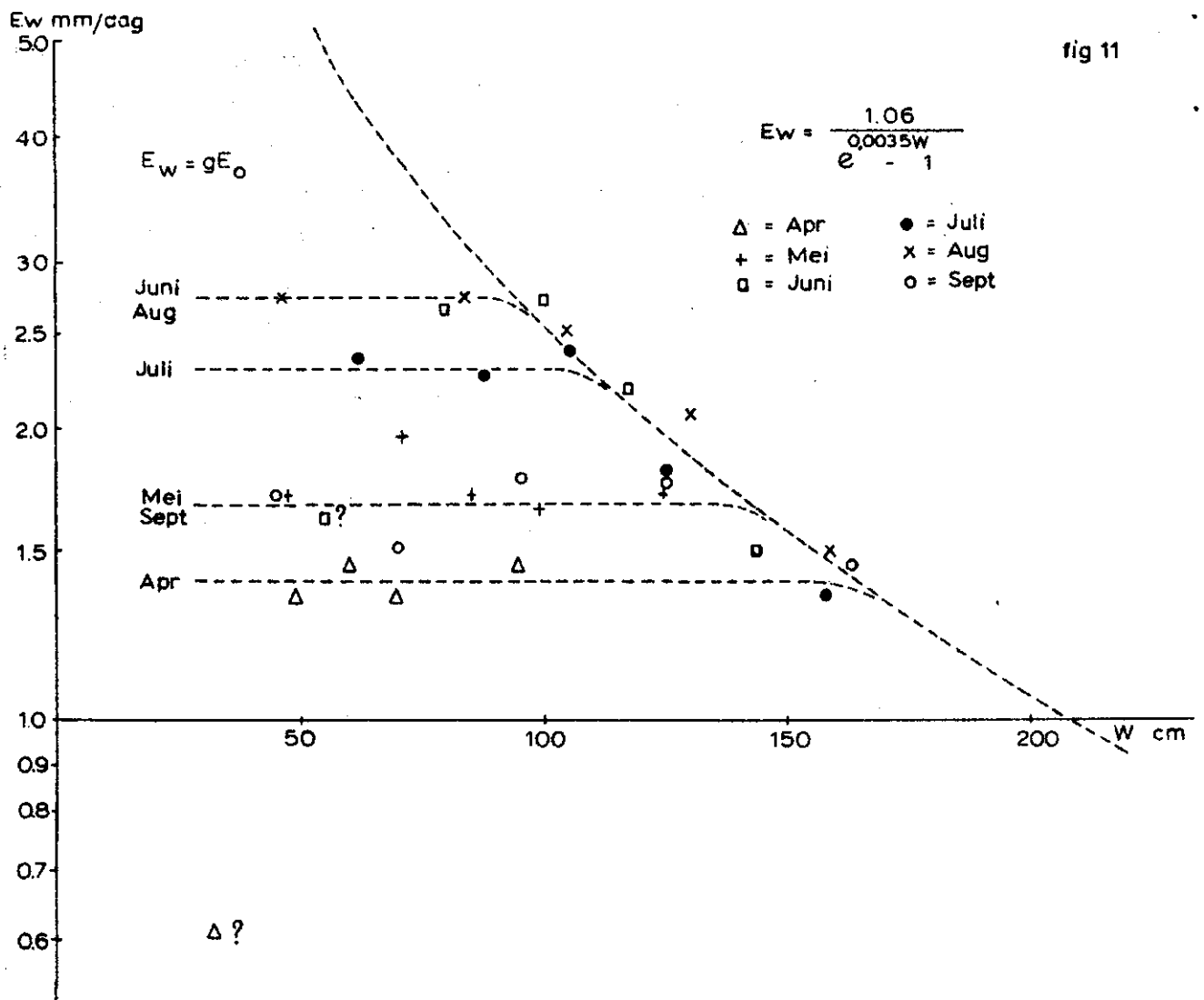


Fig. 11. Het overzicht van de wijze waarop de verdamping samenhangt met de grondwaterstand wordt door het model nauwkeurig maar ingewikkeld weergegeven. Men kan echter ook een beeld ontwerpen dat gemiddeld per maand geldt. Dit bestaat uit horizontale lijnen die beheerst worden door klimaatskenmerken als straling, wind en temperatuur en een hellende curve die wordt beheerst door de droogte van de grond, de grondwaterdiepte en de capillaire opstijging

In de hydrologie is de verdamping kwantitatief van meer belang dan de afvoer. Wel is de verdamping minder variabel, maar het valt toch op dat men zo laat en in zo beperkte mate zich met de verdamping heeft bezig gehouden. Omdat de verdamping de maat is voor de verdrogingschade, zullen de belangen van waterwinning en landbouw in onderlinge overeenstemming de nadruk doen vallen op deze waterbalansterm en de invloed ervan op de opbrengst op de voorgrond brengen.

Nu daarnaast de onbelemmerde groei van de niet-landbouwkundige vegetatie, onder de aanduiding van ecosysteem, een versterkte belangstelling ondervindt, komen er nog argumenten bij om de relatie tussen gewasgroei en waterhuishouding meer aandacht te geven. Voor wie de term ecosysteem nog nieuw en wat mysterieus is mag worden opgemerkt dat het meest bestudeerde ecosysteem dat van de landbouw is. Het groeimodel, door Kouwe behandeld, is een type van een ecosysteem in mathematische vorm. Wat hier ontbreekt om een willekeurig ecosysteem berekenbaar te maken, zijn de parameters.

Voor de waterwinningsproblemen zal de verdamping vooral van groot belang worden, zodra de droogteschade ten gevolge van waterwinning door de waterleidingmaatschappijen vergoed zal moeten worden.

In fig. 11 is een beeld gegeven van het type van oplossing, dat uit het model volgt. Men ziet hoe in april de vrij diepe waterstand van 1.60 m de verdamping op het horizontale lijndeel van de volle open water verdamping kan houden, ook wanneer een tijdlang geen regen zou vallen. In juli en augustus is de diepste toelaatbare grondwaterstand bij het hier bestudeerde profiel echter niet meer dan een meter. De horizontale lijngedeelten liggen op een niveau gE_0 , waarbij E_0 door het KNMI wordt geleverd en de waarde van g een door vereffening bepaalde parameter is.

Het ligt nu voor de hand, ten behoeve van de waterwinning voor verschillende plaatsen in het gebied vast te stellen wat de kritische ontwateringsdiepte is. Deze grootheid kan nu als richtlijn fungeren voor de diepte van afpompen voor de waterwinning, voor de eisen die de landbouwgewassen stellen en voor de grondwaterpeilbeheersing door het waterschap.

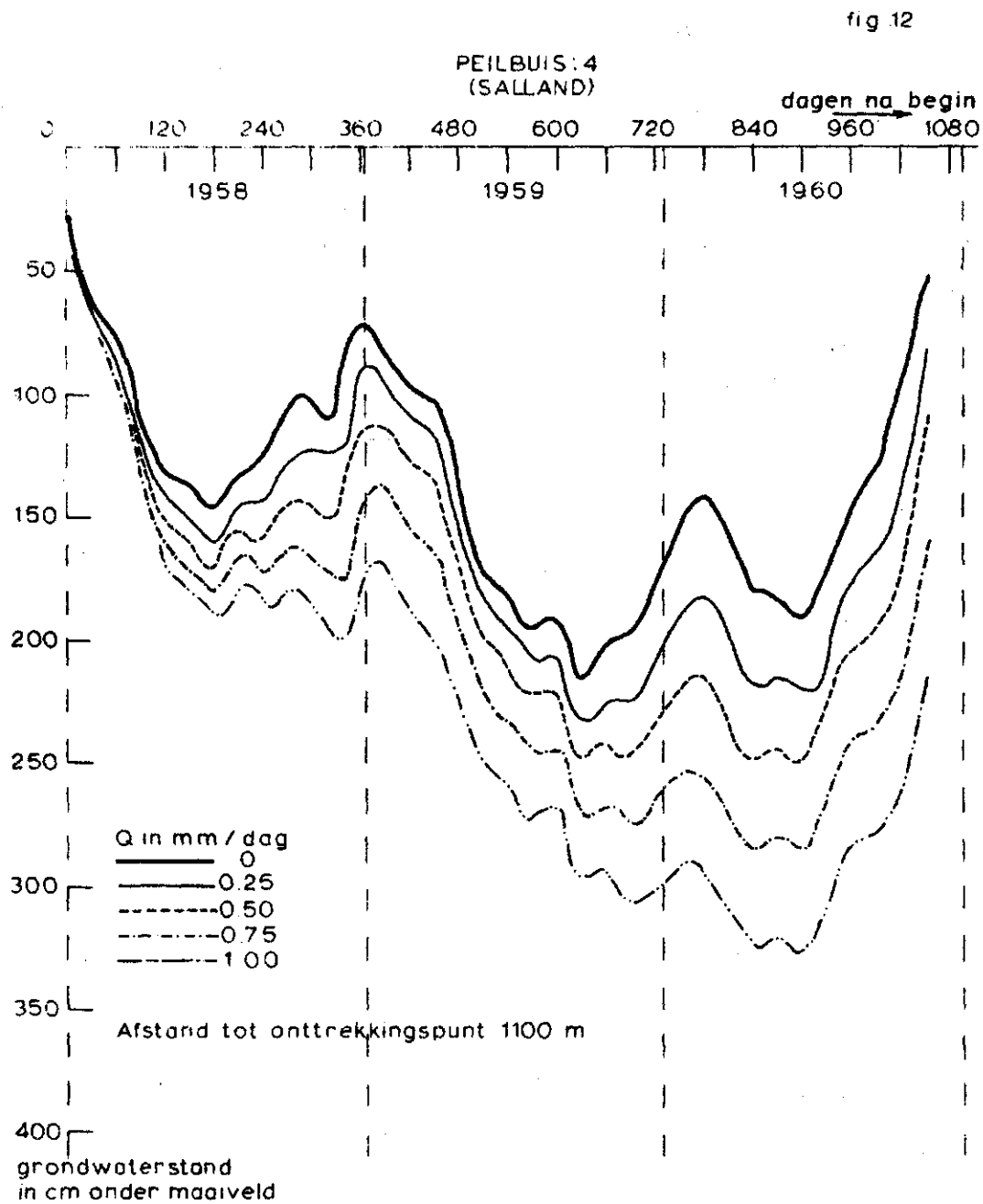


Fig. 12. Overzicht van de diepte van de grondwaterstand, die zich bij peilbuis 4 zal instellen bij wateronttrekking van 0,00 tot 1,00 mm water per etmaal door de waterwinning. Het jaar 1958 was normaal, 1959 was zeer droog, terwijl 1960 tot de vroege herfst droog maar daarna zeer nat was

In het model treedt de relatie tussen verdamping en grondwaterdiepte in een nog wat ingewikkelder vorm op dan in fig. 11. In het model is ook de regenval opgenomen, die eveneens zijn invloed uitoefent. Het staat nog niet vast, hoe men verdamping en regenval voor waterschapsgebruik in een overzichtelijke richtlijn zal moeten opnemen, aannemende dat het waterschap zijn beleid niet op computerberekeningen zal steunen en dus een eenvoudiger beheersregel zal moeten worden aangeboden.

Het waterwinningsaspect

Het aangevulde waterbalansmodel stelt in staat te berekenen, hoe groot de waterstands daling is in afhankelijkheid van de afstand tot een bepaalde waterwinplaats. Ook blijkt uit de berekening, indien men het resultaat vergelijkt met de berekening zonder waterwinning, welke hoeveelheden water het zijn die onttrokken worden ten koste van vermindering van de afvoer, van de verdamping of van de berging.

Van belang is allereerst, vast te stellen welke formule voor de grondwaterstroming naar een als pompput geschematiseerde waterwinplaats het beste bij het profiel past. Het heeft nog niet mogen gelukken hiervan een naar de profielbouw gedifferentieerd overzicht te verkrijgen, zodat het nog niet mogelijk is ten behoeve van de waterwinning op grond van routineberekeningen overzichten betreffende het waterwinningsbeleid op te stellen. Hoewel vele formules voor de pompput bekend zijn stimuleert de omvang van het onderzoek blijkbaar grote voorzichtigheid ten aanzien van het advies tot gebruik van een bepaalde formule.

In fig. 12 vindt men afgebeeld welke daling van de grondwaterstand men in de jaren 1958 tot 1961 berekent bij een gebiedsgewijze constante afpompingsintensiteit van 0.25, 0.5, 0.75 en 1.0 mm per dag.

Uit de figuur blijkt, dat in een droog jaar als 1959 waterwinning in gebieden met een voor gemiddelde jaren landbouwtechnisch optimale ontwatering niet mogelijk is, zonder aan de landbouw schade te berokkenen. Ook zonder waterwinning treden reeds grondwaterdiepten tot 2.00 m op. In dergelijke jaren zal men het water dus voor een groot deel in gebieden met wateraanvoer door kwel of door infiltratie uit nog waterafvoerende beken moeten onttrekken. Voor de win-

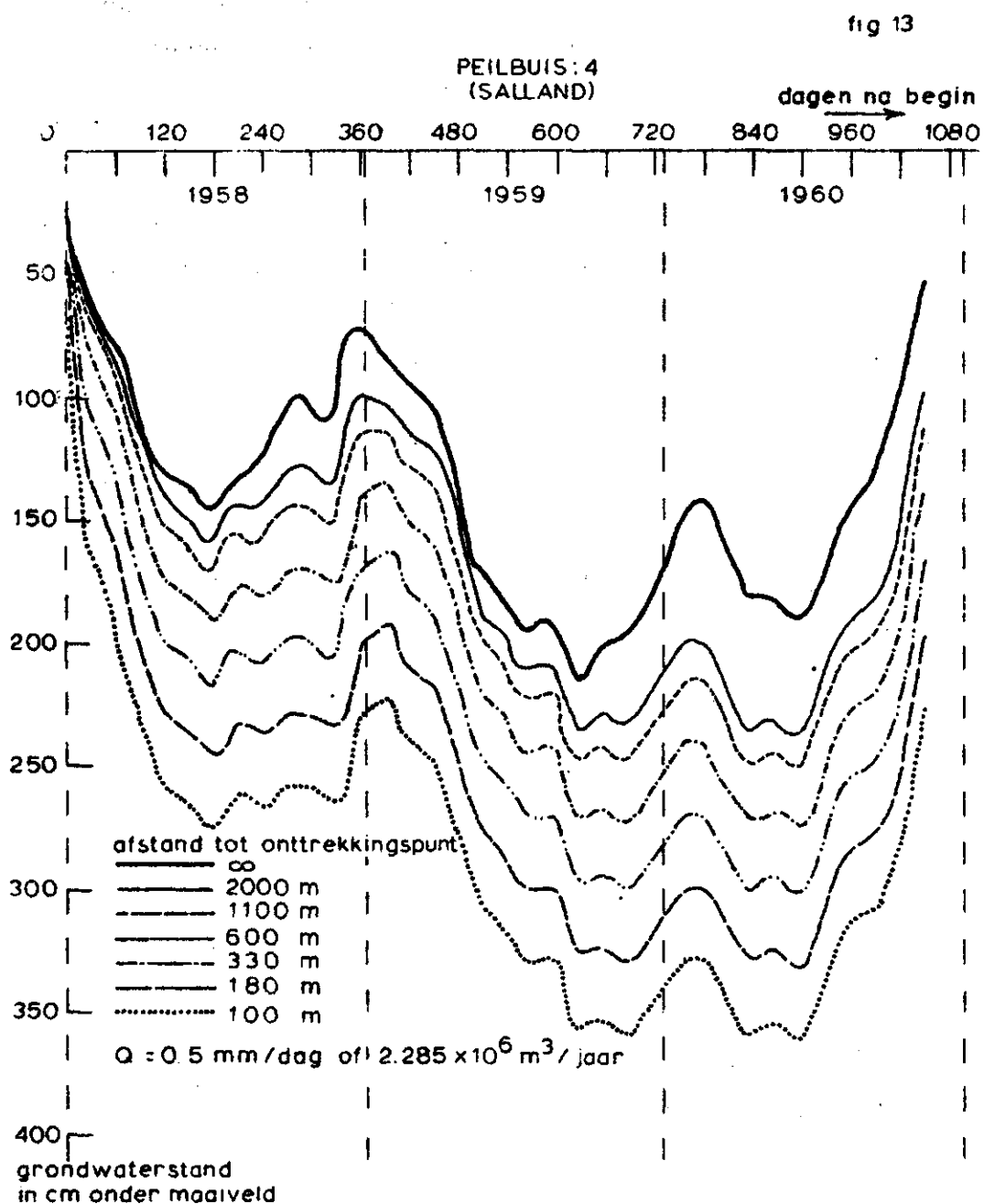


Fig. 13. Overzicht van de diepte van de grondwaterstanden op afstanden van van 100 tot 2000 m van een pompput, alsmede bij afwezigheid van een pompput ter plaatse van peilbuis 4

ning van het grootste deel van het benodigde water zullen dan echter gebieden in aanmerking komen met een zo diepe waterstand, eventueel ten gevolge van het droge jaar, dat geen landbouwschade door waterwinning meer kan ontstaan.

Het door middel van infiltratie in de winter, bijvoorbeeld tot in januari, herstellen van de grondwaterstand tot het hoogst toelaatbare niveau zou in 1959 niet veel hebben opgeleverd. De grondwaterstand had in de winter '58/'59 hoogstens tot 30 cm onder maaiveld opgezet kunnen worden. Dit zou bij een onttrekkingsintensiteit van 0.5 mm per dag de grondwaterstand eind september 1959 echter niet veel hoger dan 1.50 m onder maaiveld brengen. Dit zou het verdrogingsgevaar niet tegengaan, al zou de toestand wel zo veel verbeteren dat de situatie beter zou worden dan die welke zonder waterwinning zou zijn opgetreden. De schade door de waterwinning zou men wel hebben teniet gedaan. Zou men de schade echter geheel willen voorkomen, dan zou de grondwaterstand tot in april op 30 cm beneden maaiveld moeten worden gehandhaafd. De diepste waterstand in september zou dan tot 1.20 m beneden maaiveld dalen.

Dit zou doorgerekend voor een profiel als in fig. 11 willen zeggen, dat men voortdurend op een capillaire opstijging van 2 mm per dag zal mogen rekenen. Met de regen samen zal dit voldoende zijn om de verdrogingsschade te voorkomen.

Een complementair beeld van de daling van de waterstand bij grotere afstand tot het centrum van de waterwinning geeft fig. 13. Hier is voor een onttrekking van 0.5 mm per dag, overeenkomende met ongeveer $2.3 \times 10^6 \text{ m}^3$ per jaar bij constant pompen, de grondwaterdiepte weergegeven voor een afstand tot het winningscentrum van 100, 180, 330, 600, 1100 en 2000 meter. Met een afstand oneindig is weergegeven hoe diep de waterstand zou dalen indien geen onttrekking voor de waterwinning zou hebben plaatsgevonden.

Door de afstanden op nagenoeg gelijke logaritmische intervallen te kiezen, ontstaan in de grondwaterdiepten intervallen die bij de kleine afstanden nagenoeg gelijk uitvallen en alleen bij de grote intervallen kleiner worden tengevolge van het kiezen van een maximale afstand R als grens voor de invloed van de waterwinning. Verder ziet men dat het verschil in de diepte van afmalen over de gehele periode nagenoeg gelijk uitvalt. Dit wil zeggen, dat de afpomptrechter in het centrale gedeelte dicht rondom de pompput weinig in vorm verandert

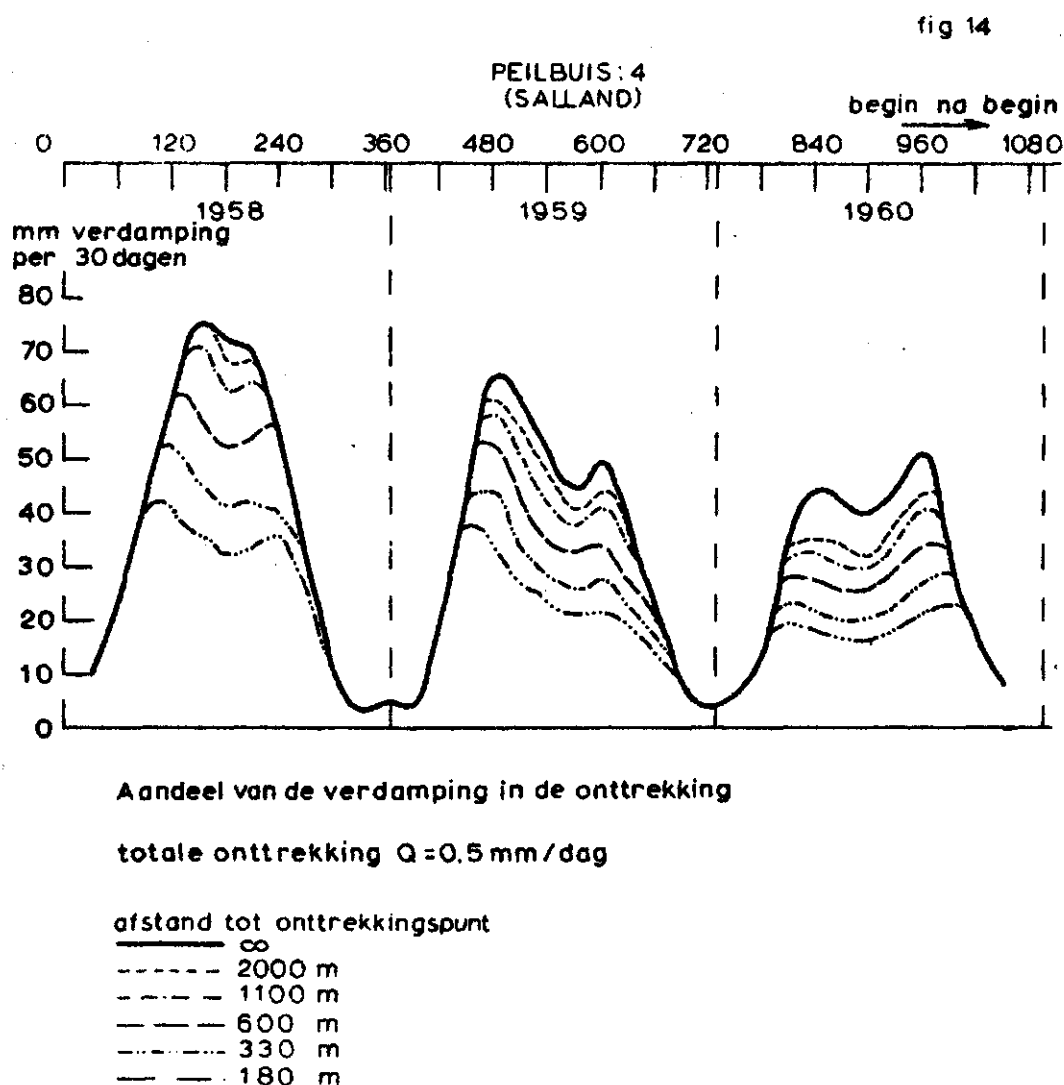


Fig. 14. Bij waterwinning wordt water onttrokken ten koste van de beekafvoer, de waterberging en de verdamping. Omdat men veelal niet op de bijdrage ten koste van de verdamping attent is, wordt aangegeven hoeveel maand millimeters er tot verschillende afstanden tot de pompput minder verdampt dan bij afwezigheid van de pompput. Men dient te bedenken dat de onttrekking ten koste van de verdamping - 120 tot 150 mm - meer kan zijn dan de gehele onttrekking omdat deze hoeveelheden gecompenseerd worden door toename van andere balanst termen zoals de berging

gedurende het jaar, hoewel ook hier, naarmate de grens R van het beïnvloedingsgebied dichter benaderd wordt, de intervallen toemen naarmate de ontwateringsdiepte kleiner is. Bij diepe ontwatering wordt de afzuigkegel dus wat smaller en spitsier. Dit hangt niet af van de grondwaterdiepte maar van de verdamping. Is die gering, dan geldt alleen het eerste deel van formule 18, daar B zeer klein wordt. In de zomer wordt B groter en wordt het $h_1 - h_2$ verschil kleiner. Het areaal waar landbouwschade kan optreden neemt dus in oppervlak af.

In fig. 14 is nog eens opmerkzaam gemaakt op een punt, dat voor het beoordelen van de hoogst toelaatbare onttrekking van belang kan zijn. Een deel van het voor de waterwinning onttrokken water wordt ontleend aan de verdampingsterm van de waterbalans. Het is reeds lang gebruik de beekafvoer als een maat voor de toelaatbare waterwinning te beschouwen. Maar ook de andere balans-termen zullen water moeten afstaan. Voor de berging spreekt dit vanzelf. Daarnaast is de hoeveelheid uit een regenbui vastgehouden hangwater een potentiële voorraad voor de waterwinning.

Maar ook de verdampingsterm neemt door wateronttrekking via een lagere waterstand W , een kleinere capillaire opstijging V_c en een grotere vochtspanning ψ in hoeveelheid af. Wel moet, om aan deze term water te kunnen ontnemen, zoals fig. 14 aantoont, de verdamping een zekere omvang hebben. Anders wordt de verdamping door het klimaat en niet door de vochtspanning bepaald.

Bij diepe verlaging van de waterstand zoals op 180 m van het winningscentrum optreedt, toont de figuur aan dat gedurende 8 maanden de verdamping een deel van het water afstoot, terwijl bij ondiepe waterstand, zoals die tussen 1100 en 2000 m optreedt, de verdampingsterm maar gedurende 5 maanden water beschikbaar stelt.

Wanneer het dus landbouwkundig niet nodig zou zijn om elke dag het gewas zijn 2 tot 3 mm water te laten verdampen op grond van het vermoeden, dat hier luxe consumptie bij zou optreden, dan zou men een diepere waterstand kunnen toelaten zonder dat schade ontstaat. Men zou dan niet alleen het door de beek afgevoerde water, maar tevens de verdamping als termen mogen beschouwen, waaraan een deel van het water kan worden ontnomen, dat voor de waterwinning beschikbaar zou komen.

De droge tijd viel in 1959 laat in. Zou dit vroeger zijn geweest of zou de zomerregen in 1960 minder overvloedig zijn geweest, dan zou men in dat jaar een veel schadelijker droogte hebben ervaren. De tegenmaatregelen zouden dan minder resultaat hebben opgeleverd. De kans op een combinatie van een droge winter gevolgd door een droge zomer is echter gering. Tegen zo kleine kansen kan men economisch geen maatregelen meer nemen. Ook voor de waterwinning verliezen deze situaties aan betekenis.

De berekeningen volgens het model zullen leren, dat onder die omstandigheden ook zonder onttrekking de landbouwschade reeds vrijwel maximaal zal zijn, zodat de onttrekking geen ongunstig effect meer zal kunnen uitoefenen. De groei van het gewas wordt dan vrijwel beheerst door de regen. De capillaire opstijging wordt van een te verwaarlozen omvang. Hieruit mag de conclusie getrokken worden dat de rekentechniek, die in dit onderzoek wordt toegepast, te eniger tijd aanvulling zal behoeven van een op de kans van optreden gericht rekenschema, een zogenaamd stochastisch model. Aan deze techniek is tot dusverre echter geen aandacht gewijd.

Het op de meest gedifferentieerde praktijkvragen gerichte rekenschema

Uit de voorafgaande beschouwingen volgt een berekeningswijze, die overeenkomt met de doelstelling van een zo volledig mogelijke aanpassing van het afvoerbeheer van de waterschappen aan een optimale veilige winningscapaciteit van de waterwinning en een minimale gewasschade voor de landbouw.

De berekening volgt nauw de technische volgorde in belangrijkheid. Allereerst wordt gestreefd naar het vaststellen van de beekwaterstanden in hun afhankelijkheid van de afvoer aan het uitstromingspunt van de beek uit het stroomgebied. Dit uitstromingspunt moet samenvallen met het punt waar het debiet van de beek wordt gemeten.

Men richt de berekening eerst op het bepalen van de afvoer van de beek $A_{R, \text{beek}}$ volgens formule 11 op het punt R, waar de beek het stroomgebied verlaat. De berekende waarde voor $A_{R, \text{beek}}$ wordt getoetst aan de op het punt gemeten beekafvoer $A_{R, \text{beek}}^*$. De parameters worden daarmee bepaald, die de aanpassing van de formule

OVERZICHT 2

beschikbare gegevens			
	stroom gebied	perceel	
dagwaarnemingen	N_g E_{go}	N E_o S_R	
toetsings gegevens	A_R beek	W	
een of meer weeks	W_{go} B_{gzo}	W_o B_{zo}	
beginwaarden			
eigenschap	formule ns	eigenschap	formule ns
I_g	6	I	6
A_g	7, 8, 9, 10		
A_R beek	11 toetsing aan waargenomen A_R beek		
S_R	12 aansluiting aan waterschapsbeheer		
S_1	34 $S_1 = a_1 S_R - b_1$ \longrightarrow	S_1 en S_2	substitueren in formule 8 en 9
S_2	35 $S_2 = a_2 S_R - b_2$ \longrightarrow	A	7, 8, 9, 10
E_{gw}	13, 14	E_W	13, 14 } aansluiting naar
ψ_g	15	ψ	15 } opbrengst model
V_{gc}	3	V_c	3
B_{gz1}	4	B_{z1}	4
$h_1 - h_2$	18	$h_1 - h_2$	18 } aansluiting naar
A_{win}	19	A_{win}	19 } water winningsbeleid
B_{gh1}	16a $B_{gh1} - B_{gh0} = I_g - V_{gc} - \sum A_g - A_{gwin}$	B_{h1}	16b $B_{h1} - B_{h0} = I - V_c - \sum A - A_{win}$
W_{g1}	17	W_1	17 toetsingen waargenomen W

aan de gemeten afvoeren zo goed mogelijk maakt.

De balanstermen voor het stroomgebied I_g , A_g , E_{gw} , B_{gz} en B_{gh} die bij de toetsing van de gebiedsafvoer A_{beek} worden gevonden zowel als de variabelen W_g , ψ_g en V_{gc} tesamen met de parameters β_g , B_{g1} , B_{g2} , B_{g3} , C_{g1} , C_{g2} , d_{g1} , d_{g2} , α_g en k_{g0} hebben de betekenis van gemiddelden voor het stroomgebied in zijn geheel, gerekend voor zover het boven het punt R ligt waar de beekafvoer wordt gemeten. Deze getallen voor gebiedsgemiddelden worden onderscheiden van de gegevens voor een perceel door aan het symbool een g toe te voegen.

Uit deze eerste vereffening worden met behulp van formule 12 de beekwaterstanden S_R in punt R berekend. Deze waterstanden worden als dagcijfers bekend. Hierna volgt de vereffening voor het perceel, waarop de grondwaterstanden werden waargenomen. Deze grondwaterstanden op het perceel vormen bij deze tweede vereffening de toetsingsgrootheid.

Ook hierbij worden weer de balanstermen, variabelen en parameters vastgesteld, die nu echter alleen voor de paar aren rondom de waterstandsbuis gelden. De uitkomsten zullen tengevolge van de gebiedsinhomogeniteit niet gelijk zijn aan de uitkomsten voor het gehele stroomgebied. De uitkomsten voor het perceel zullen zonder index worden weergegeven.

De berekening heeft nu volgens het model in overzicht 2 plaats.

In het rekenmodel vindt men de formules met het nummer van overzicht 1 weergegeven. Alleen voor S_1 en S_2 vindt men met formule 34 en 35 de omrekening van de beekwaterstand S_R in de beekstand ter plaatse van de drainagebasis voor het water bij de grondwaterstandsbuis weergegeven. Deze formules werden reeds voor formule 33 gebruikt. Verder vindt men in de formules 16a en 16b de formule 16 terug, maar nu de waterwinning $\overline{A_{g.win}}$ als totaal voor het stroomgebied en A_{win} als pleksgewijze onttrekking voor het perceel toegevoegd. De waarde van A_{win} is afhankelijk van de afstand tot de pompput, de waarde van $\overline{A_{g.win}}$ is dit niet, omdat dit een winningsintensiteit is die voor het gehele stroomgebied geldt en dus meer dan één put kan omvatten.

In de berekening voor het stroomgebied treft men de formules 11, 12, 34 en 35 aan, die in de formules voor de waterbalans van het perceel ontbreken. Deze worden voor het perceel vervangen

door de berekende waterstanden S_1 en S_2 , die in de beek optreden op de plaats, waar ze de afvoer van het perceel op de perceels-sloot of beek beheersen. Deze S_1 en S_2 worden in de formules 8 en 9 voor het perceel ingevoegd.

In formule 16b heeft A_{win} de betekenis, die reeds eerder werd besproken en levert geen moeilijkheden. De juiste berekening van $A_{g, win}$ is echter wel ingewikkeld. Men zou de invloed van de afname van de verdamping bij diepere grondwaterstand op de water-balans nauwkeurig in aanmerking willen nemen. Daartoe zou ter berekening van de juiste waarde van $B_{gh1} - B_{gh0}$ de waarde van V_{gc} en $\sum A_g$ over de afstand r tot de pompput geïntegreerd moeten worden. Voor $A_{g, win}$ is deze integratie niet nodig omdat de onttrekking door de waterwinning een gegeven is.

Omdat de afpomptrechter meestal maar een gedeelte van het stroomgebied zal omspannen, zal het voor de hand liggen het gebied te verdelen in een oppervlak, dat wel en dat niet door de afpomptrechter wordt geraakt.

Het lijkt nu voor de hand te liggen de waarden voor $\sum A_g$ met een factor n te vermenigvuldigen gelijk aan de grootte van het stroomgebied min het areaal met een afvoer $\sum A_g$ gelijk nul, gedeeld door het oppervlak van het stroomgebied. Op dezelfde wijze zou men voor V_{gc} de grootte van een equivalent gebied met een capillaire opstijging gelijk nul kunnen bepalen en met inacht nemen van de grootte van het stroomgebied een reductiefactor m berekenen. Met de reductiefactoren m en n , toegevoegd aan $\sum A_g$ en V_{gc} zou althans een eerste aanpassing van de beekwaterstand aan de - meestal tegenover de afvoer beperkte - onttrekking door de waterwinning mogelijk gemaakt worden.

Er is tot dusverre met dit model door uitvoering van proefberekeningen geen ervaring opgedaan. Daardoor is de meest doelmatige rekentechniek, die zowel met de gewenste en bereikbare nauwkeurigheid als met de omvang van het rekenwerk rekening houdt, nog niet onderwerp van nadere studie geweest.

Het hiervoor uitgewerkte rekenmodel omvat een aanzienlijk deel van de hydrologie. Dit zal echter voor een deel van de doelstellingen onnodig gecompliceerd zijn. Vormen alleen de toetsingswaarden, dus beekafvoer en grondwaterdiepte, het doel van het rekenen, dan kan men op grond van het principe van de compenserende fouten met veel

eenvoudiger modellen toe.

Men kan nu op grond van de berekende parameterwaarden nagaan welke strategie men voor niet getoetste eigenschappen als het stuwprogramma van de waterschappen of het moment van slootonderhoud moet volgen om de grondwatervoorraad voor landbouw en waterwinning zo goed mogelijk in te stellen. Dan zullen samengestelde modellen als in overzicht 2 weergegeven nodig zijn en zal men de omvang van het rekenwerk aanvaardbaar dienen te maken. De modellen daartoe zullen gereed moeten liggen. Maar men kan dan ook voor de praktijk maatregelen ten aanzien van de hydrologie treffen, die op een aanzienlijk bredere wetenschappelijke basis berusten dan tot dusverre mogelijk was.

Slotbeschouwing

Het onderzoek dat in de voorafgaande bladzijden beschreven werd, is van belang ten aanzien van het vinden van een goede technische en economische oplossing wat betreft de vraagstukken van de waterhuishouding en waterbeheersing.

Daarnaast heeft het waarde als een prototype van het omvattende onderzoek waar de wetenschap zich meer en meer op gaat richten om te voldoen aan de praktijkvragen, die veelal van een gecompliceerde aard zijn. Het op steeds meer disciplines of meer facetten van dezelfde disciplines steunende rekenmodel kan thans met de moderne grote rekenautomaten, die geleidelijk voor het onderzoek beschikbaar komen, worden bewerkt. Ook worden de technieken voor de gewenste bewerking - veelal vereffening - geleidelijk ontwikkeld.

De knelpunten komen meer en meer bij de onderzoeker te liggen. Van hem wordt gevraagd, de praktische vragen te overzien, de processen die door de praktijkvraag aan de orde gesteld worden wetenschappelijk te kunnen omvatten en mathematisch te kunnen formuleren. Daarnaast dient hij een model te kunnen samenstellen uit voorhanden bouwstenen en de mathematische behandeling te kunnen aanwijzen of zelf uitvoeren.

De synthese zal zijn definitieve vorm in een enkele geest moeten krijgen. Het aantal werkers met de noodzakelijke synthetische instelling is echter, mede ten gevolge van het analytisch gerichte onder-

wijs, maar klein. Er ligt hier voor de scholing van werkers in de synthese van de relevante specialistische kennis zowel bij de universiteiten als in dienstverband een brede taak te wachten. Van primair belang zal zijn, vast te stellen welke beperkingen bij die scholing nog toelaatbaar zijn.

De op de praktijk gerichte doelstelling

Het waterbalansonderzoek dat op de watertoewijzing gericht is, is interessant omdat het een band legt tussen het waterbeheersonderzoek voor de waterschappen - die een in hoofdzaak technische taak uitvoeren - met het waterwinningsonderzoek voor de waterleidingmaatschappijen, dat een heel wat sterker op de economie gericht doel heeft. Tenslotte wordt een band gelegd met de landbouw, waarbij het doel een sterk sociale inslag heeft. Wil men hier het milieubeheer nog aan toevoegen, dan zal de toekomst ongetwijfeld ook hieraan vooral een sociale betekenis hechten.

Bij het economische en sociale onderzoek is het een eerste vraag of de belangen parallel lopen of tegengesteld zijn. Bij de waterhuishouding zijn de belangen van landbouw en waterwinning tegengesteld, maar er is een oplossing te vinden die ze parallel doet lopen, namelijk door het inschakelen van waterconservatiemaatregelen. In alle onderzoekingen, op welk doel ook gericht, zal men zich de vraag moeten stellen hoe tegengestelde belangen in gelijkgerichte zullen kunnen worden omgezet. Vindt men daarvoor een oplossing dan is daarmee een belangrijke grondslag voor het oplossen van het vraagstuk gelegd.

Aan het opsporen van de technisch meest bevredigende oplossing dient nog veel aandacht gegeven te worden. Het blijkt wel dat de wetenschappelijke grondslagen tot oplossen van de praktische vraag in grote overmaat ter beschikking staan. Het fundamentele onderzoek heeft het wetenschappelijke aandeel reeds in veel detail geleverd. Dit onderzoek is echter ten aanzien van allerlei neveninvloeden onvolledig, doordat het wetenschappelijke werk gebaseerd wordt op de richtlijn, slechts één factor te variëren en alle andere constant te houden. In de praktijk varieert echter in principe alles en blijft niets constant. Dit veel-variabelen aspect van het praktische onderzoek vergt thans nog de meeste aandacht. Hoeveel parameters moet men meenemen om een model te verkrijgen, dat zowel een goede

aanpassing geeft - wat niet moeilijk is - als waarmee zinvolle waarden voor de parameters berekend kunnen worden. Dit laatste is nog niet in alle opzichten opgelost. Ook de vorm die men aan het model moet geven zal nog aandacht vergen. Zo treft men in het waterbalansmodel nog onzekerheden in de bergingsterm aan. In de nevenmodellen zou het van belang zijn, een overzicht te hebben van de veelvuldigheid, waarmee bepaalde formules voor de pompput wegens de geologie van Nederland voor toepassing in aanmerking komen. Deze zullen dan op grond van deze urgentievolgorde geprogrammeerd moeten worden.

Ook ten aanzien van de reactie van de landbouwgewassen op de wateroverlast bestaat in waterrijk Nederland nog geen zekerheid omtrent de aard van de plantenfysiologische reactie. Of deze reactie afhankelijk is van de diffusie van zuurstof, of van de omvang van het doorwortelde, voldoende zuurstofrijke bodemareaal of dat het een gelijktijdige reactie op beide effecten is, staat nog onvoldoende vast.

Het ziet er overigens naar uit dat deze vragen wel opgelost zullen zijn nog voor dat belangrijke aspecten als de economische en de sociale invloeden op het goede beheer van het beschikbare water hun doorrekenbare oplossing zullen hebben gevonden.

De betekenis als prototype van onderzoek

Het waterhuishoudingsonderzoek heeft naast de op de praktijk gerichte doelstelling nog betekenis als prototype van toepassend, samenvattend onderzoek, ook waar het andere onderwerpen betreft dan de waterhuishouding. Het is een type van onderzoek met de eigenschap alle effecten binnen de gebieden van verschillende disciplines als onderdeel van een enkel geheel te omvatten en op te lossen.

Het gaat niet meer om de hydrologie of het waterschapsbeheer, de landbouwplantenteelt of de mathematische techniek afzonderlijk. Het gaat om het gehele complex van oorzaken en gevolgen, die afhangen van de mate van waterwinnen als technische ingreep in de waterhuishouding.

Bij het toepassen van onderzoekstechnieken, die deze samenvattende modellen gebruiken, gaat het onderzoek zijn gebruikelijke

grenzen verliezen en ontstaan er nieuwe eenheden van samen-horende problemen, die overigens met de oude eenheden van de praktische toepassing overeenkomen.

Bestonden de eenheden van samenhangende kennis tot dusverre uit de verzameling van alle pompputformules of de verzameling van alle reactiepatronen, die het gewas te zien geeft bij zijn gedrag ten aanzien van de verschillende groeifactoren, dan wordt men thans geconfronteerd met de wenselijkheid van een andere ordening in de bijeenhangende kennis. Men ziet nu hoe een ingreep in de waterhuishouding - met al zijn effecten op de meest verschillende aspecten en gevolgen - als de grondslag van de indeling wordt gezien. De effecten van zo'n ingreep in de waterhuishouding te leren overzien wordt de doelstelling van onderzoek en toepassing. Dit streven naar inzicht bepaalt de omgrenzing van het onderzoek. Men kent deze denkwijze uit het economisch bedrijfsonderzoek, maar kan deze gedachtegang ook volgen indien het probleem geen economische maar een complexe technische of sociale doelstelling heeft.

De aanduiding met geïntegreerd of samenvattend onderzoek is onvolledig, omdat dit woord alleen duidt op de aanwezigheid van verschillende onderwerpen van studie en niet de nadruk legt op de eisen die men stelt aan de omgrenzing van het onderzoek. Het doel moet daarbij zijn, dat men de voldoende belangrijke gevolgen volledig en uitputtend in de studie tracht te incorporeren, wat mogelijk door de aanduiding 'samenvattend compleet onderzoek' zou kunnen worden weergegeven. Dit zou een onderscheiding opleveren ten opzichte van 'praktisch onderzoek' dat veelal beperkingen aan de onderzoekstechniek oplegt op grond van beschikbare tijd of deskundigheid.

De centra van scholing en van wetenschappelijk onderzoek zullen naast de gebruikelijke academische één-variabelen-techniek zich op de nieuwe eenheden van het samenvattend complete onderzoek dienen te richten. De nieuwe wegen van het op de praktijk gerichte deel van onderwijs en onderzoek, die thans geleidelijk begaanbaar worden, zal men moeten leren bewandelen.

Voor vele onderwerpen van onderzoek en toepassing is deze techniek van modelvereffening toepasbaar. De opgehoopte hoeveelheid fundamentele kennis is zo omvangrijk, dat het steeds mogelijk zal

zijn een model op te stellen. Dit geldt te meer, daar de berekening van de betrouwbaarheid van de parameters aanwijzing verschaft, welk deel van het model de onzekerste bijdrage aan de verklaring van de waarnemingen levert en het eerste in aanmerking komt te worden vervangen door een ander, beter deelmodel. Levert dit een betere aanpassing, dan is het nieuwe model te prefereren en kan het oude vervallen. Op deze wijze kan worden nagegaan of de spoorwerkactiviteiten op het juiste doel gericht zijn of dat de moeite oneconomisch besteed wordt aan een onderwerp, dat reeds goed overzien kan worden, terwijl hiaten in de kennis ten aanzien van andere factoren blijven voortbestaan.

Het waterwinningsonderzoek is een eerste vorm van een nieuwe complete synthetische techniek, waarvoor een belangrijke toekomst is weggelegd. Daarbij zal veel medewerking en ondersteuning nodig zijn om de onvolledigheden van het fundamentele onderzoek aan te vullen. Het doel daarbij om modellen bij voorbaat gereed te maken voor de mogelijke facetten die het onderzoek als aanvulling kan nodig hebben, maakt dat ook praktici van deze technieken zullen kunnen gebruikmaken om hun eigen inzicht in het probleem te kwantificeren.

Het is namelijk een voordeel van de rekenmodellen, dat daarin een grote hoeveelheid specialistische kennis is opgeslagen, die door de rekenautomaat zonder ingrijpen van buiten op de juiste wijze in de bewerking wordt toegepast. Deze kennis behoeft de practicus zelf niet ter beschikking te hebben. Zijn inzicht zal meer de randvoorwaarden van het onderzoek dienen te betreffen en zal zich uiten in de juiste keuze van het model en het juiste toepassen van de resultaten van de berekening in zijn verdere praktische beschouwingen.

Het valt te hopen dat deze toekomstvisie op de ontwikkeling van een op praktische problemen gerichte - maar ook in het wetenschappelijke onderzoek in grote omvang bruikbare - samenvattende complete vorm van onderzoek, die steun en medewerking van de praktijk zal krijgen, die nodig zijn om het raamwerk van een dergelijk type van onderzoek met de nodige detailkennis op te vullen. Dit zal tot gevolg hebben, dat ook buiten de groep van praktici de belangstelling ontstaat en de gunstige verwachtingen gemeengoed worden,

die voor dit type onderzoek nodig zijn om zich te kunnen ontwikkelen.

Daarnaast zal de actieve medewerking op wetenschappelijk gebied zich in sterke mate moeten ontwikkelen. Dit zal deze techniek tot een betrouwbare en zonder gevaren van onnauwkeurigheid of onjuistheid toepasbare werkwijze kunnen laten uitgroeien. Het steeds sterker onderling verweven karakter van de problemen in een dichtbevolkt modern land vergen deze nieuwe techniek om de vragen die de toekomst stelt te kunnen oplossen.